

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

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

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO



***CONFIGURACIONES DE VEGETACION PARA
MEJORAR LAS CONDICIONES DE CONFORT TÉRMICO
EXTERIOR EN AREAS RESIDENCIALES.
CASO DE ESTUDIO: ENSENADA, B.C.***

T E S I S

que para obtener el grado de
MAESTRA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Presenta

MARIA FERNANDA ARRIAGA OSUNA

Directora de Tesis

DRA. KAREN ESTRELLA MARTINEZ TORRES

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA

JUNIO DE 2021

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



MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

CONFIGURACIONES DE VEGETACIÓN PARA MEJORAR LAS CONDICIONES
DE CONFORT TÉRMICO EXTERIOR EN ÁREAS RESIDENCIALES.
CASO DE ESTUDIO: ENSENADA B.C.

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRA 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. Júlio César Rincón Martínez
Identificador ORCID: 0000-0002-1946-3609

Revisor de tesis: Dr. Marcos Eduardo González Trevizo

Revisor de tesis: Dr. Francisco Fernández Melchor

Ensenada, B.C. 08 de junio de 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Configuraciones de vegetación para mejorar las condiciones de confort térmico exterior en áreas residenciales. Caso de estudio: Ensenada, B.C.

TESIS

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

María Fernanda Arriaga Osuna


Aprobada por:




Dra. Karen Estrella Martínez Torres
Directora de tesis




Dr. Julio César Rincón Martínez
Co-director de Tesis



Dr. Marcos Eduardo González Trevizo
Miembro del comité



Dr. Francisco Fernández Melchor
Miembro del comité



Dr. José Francisco Armendáriz López
Miembro del comité

Ensenada, Baja California, México. Junio 2021

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

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

Ensenada, B.C., 4 de junio de 2021



María Fernanda Arriaga Osuna

AVAL DE TERMINACIÓN DE TESIS

Fecha: 8 de junio de 2021

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

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

MARÍA FERNANDA ARRIAGA OSUNA

ha concluido su tesis de grado titulada:

**CONFIGURACIONES DE VEGETACIÓN PARA MEJORAR LAS CONDICIONES DE CONFORT
TÉRMICO EN EXTERIOR EN ÁREAS RESIDENCIALES. CASO DE ESTUDIO: ENSENADA, B.C.**

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.

DRA. KAREN ESTRELLA MARTÍNEZ TORRES

DIRECTOR DE TESIS



FIRMA



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

DEDICATORIA

A mi madre:

*Por su apoyo incondicional en todo lo que me he propuesto en la vida y su
compañía en este camino.*

AGRADECIMIENTOS

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

Por brindarme sus conocimientos y siempre demostrar interés sobre mi trabajo. Sin su orientación y paciencia, no me habría sido posible enfrentar las adversidades que se me presentaron en este posgrado. Gracias por impulsarme a ir más lejos de lo que todos pensaron.

A mi co-asesor, Dr. Julio César Rincón Martínez :

Por sus comentarios para el desarrollo de esta investigación y la dedicación en transmitir sus conocimientos, sin limitarse a lo que abarca la carta descriptiva.

A el profesor Dr. Marcos Eduardo González Trevizo:

Por resolver nuestras inquietudes con la mejor disposición y contagiar su pasión por la búsqueda del conocimiento. Representa a una figura digna de admiración.

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

Por sus comentarios y críticas durante las clases de las distintas materias del posgrado. Cada uno de ustedes son parte importante en mi formación como investigador.

A el profesor Dr. Gonzalo Bojorquez Morales:

Por su ayuda en el trámite de la beca CONACYT y sus aportaciones en los coloquios de avances de investigación.

A CONACYT:

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

RESUMEN

El fenómeno de Isla de Calor Urbana (UHI) producto de la creciente urbanización, ha causado impactos en el confort térmico de los ocupantes de las ciudades, frecuentemente en el verano, con efectos potencialmente graves para la salud humana. Es importante tomar medidas para garantizar la habitabilidad en las ciudades por medios pasivos como los árboles de sombreado, que por medio de intercepción de la luz solar, evapotranspiración y la absorción de CO₂, enfrian el ambiente urbano. El presente trabajo de investigación, realizado en el área residencial de Ensenada, Baja California, México, analiza el confort térmico a través del Índice de "Temperatura Fisiologicamente Efectiva" (PET) así como sus características microclimáticas al simular configuraciones dispersas de árboles de sombreado. Para ello fueron utilizadas herramientas como Data Logger en sitio para registrar temperatura y humedad; y el software ENVI-met que es un modelo de microclima basado en cuadrículas, tridimensional y de pronóstico, diseñado para simular interacciones complejas entre la superficie, la vegetación y el aire en el entorno urbano (Tsoka et al., 2018).

A través de la correlación de variables asociadas a la vegetación, como la altura del dosel, la estructura de la planta, el emplazamiento y el tipo de hoja, se busca obtener un impacto positivo en el confort térmico a través de la calidad del sombreado en la zona de implementación. La comparación entre diferentes patrones de plantación, revela que para maximizar los beneficios de enfriamiento, se sugiere utilizar arreglos de árboles individuales, con una disminución de hasta 13,49 °C PET a las 15 h 00 (hora crítica). Esta investigación pretende ayudar a usuarios de distintas disciplinas, como arquitectos, paisajistas, ambientalistas, entre otros, pero principalmente a los usuarios que habitan en áreas residenciales, a seleccionar un modelo adecuado de vegetación, que tenga en cuenta los efectos en el microclima urbano al aire libre y optimice el confort térmico.

Palabras clave: Confort térmico, Árboles de sombreado, Isla de calor urbana, Áreas residenciales, ENVI-met.

ABSTRACT

The phenomenon of Urban Heat Island (UHI), a product of increasing urbanization, has caused impacts on the thermal comfort of city occupants, frequently in the summer, with potentially serious effects on human health. It is important to take measures to guarantee habitability in cities by passive means such as shading trees, which, through the interception of sunlight, evapotranspiration and the absorption of CO₂, cool the urban environment.

This research work, conducted in a residential area of Ensenada, Baja California, Mexico analyzes thermal comfort through the "Physiologically Effective Temperature" index (PET), as well as its microclimatic characteristics when simulating dispersed configurations of trees of shading. For this, tools such as Data Logger were used on site to record temperature and humidity; and the ENVI-met software that consists a prognostic, three-dimensional, grid based microclimate model, designed to simulate complex surface-vegetation-air interactions in the urban environment (Tsoka et al., 2018).

Through the correlation of variables associated with the vegetation, such as the height of the canopy, the structure of the plant, the location and the type of leaf, it is sought to obtain a positive impact on thermal comfort through the quality of shading in the deployment area. Comparison between different planting patterns reveals that to maximize cooling benefits, it is suggested to use individual tree arrangements, with a decrease of up to 13,49 °C PET at 15 h 00 (critical hour). This research is intended to help users from different disciplines, such as architects, landscapers, environmentalists, among others, but mainly users who live in residential areas, to select a suitable model of vegetation, which considers the effects on urban microclimate when fresh air and optimize thermal comfort.

Keywords: Thermal comfort, Shade trees, Urban heat island, Residential areas, ENVI-met.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

I. ÍNDICE DE TABLAS	14
II. ÍNDICE DE FIGURAS.....	15
III. LISTADO DE ABREVIATURAS, CARACTERES Y SIMBOLOS	22
INTRODUCCIÓN	1
.....	3
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1. Justificación	5
1.2. Objetivos de investigación	6
1.2.1. Objetivo general	6
1.2.2. Objetivos específicos	6
1.3. Pregunta de investigación	7
1.4. Hipótesis.....	7
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	9
2.1. Estado del Arte	21
2.2. Marco Teórico.....	26
2.2.1. Origen de la Isla de Calor Urbana (UHI)	26
2.2.1.1. Geometría urbana	27
2.2.1.2. Ecologización Urbana.....	29
2.2.1.3. Materiales Urbanos	29
2.2.1.4. Consumo energético	30
2.2.2. Estrategias de mitigación de la UHI	31
2.2.3. Enfriamiento por medio de vegetación.....	33
2.2.4. Árboles de sombra.....	33
2.2.5. Características de los árboles de sombreado	36
2.2.5.1. Índice del Área Foliar (LAI)	36
2.2.5.2. Densidad del Área Foliar (LAD).....	38
2.2.6. Confort térmico en los espacios urbanos	40

2.2.7. Índices de evaluación del confort térmico	41
2.2.7.1. Temperatura Fisiológicamente Efectiva (PET)	41
2.2.7.2. Voto Medio Predicho (PMV)	43
2.2.7.3. Índice Universal del Clima Térmico (UTCI)	44
2.2.8. Parámetros climáticos que afectan al Confort Térmico.....	45
2.2.9. Métodos de estudio de confort térmico exterior	46
2.2.9.1. Monitoreo (estudio en campo).....	46
2.2.9.2. Simulación (Software)	46
2.2.10. ENVI-met Software	47
2.2.10.1. Módulo de vegetación	48
.....	53
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	54
3.1. Caracterización del estudio	54
3.1.1. Objeto de estudio.....	57
3.1.2. Variables	57
3.2. Área de estudio	58
3.2.1. Clima de Ensenada B.C.....	58
3.2.1.1. Temperatura.....	59
3.2.1.2. Humedad Relativa	61
3.2.1.3. Radiación solar.....	62
3.2.1.4. Viento	63
3.3. Descripción del caso de estudio	66
3.4. Unidad de análisis	67
3.5. Monitoreo.....	68
3.5.1. Instrumentación	68
3.5.1.1. Características y especificaciones de Data Logger	69
3.5.2. Ubicación de la instrumentación	70
3.5.3. Monitoreo y calibración	71
3.5.4. Día Típico.....	73
3.6. Caracterización de la vegetación.....	74

3.8. Simulación	75
3.8.1. Escenarios de simulación	75
3.8.2. Software	78
3.8.3. Configuración de ENVI-met	78
3.8.4. Módulos	80
3.8.4.1. Spaces	81
3.8.4.2. Albero	82
3.8.4.3. EnviGuide	82
3.8.4.4. BioMet	84
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	88
4.1. Variaciones del microclima	88
4.1.1. Temperatura del Aire (Tair)	89
4.1.2. Humedad Relativa (H.R.)	97
4.1.2. Temperatura Media Radiante (Tmrt)	104
.....	114
4.2. Comparación del Confort térmico Humano (PET)	119
4.2.1. C1CU (04 de octubre)	120
4.2.3. C2CU (04 de octubre)	122
4.2.4. C3CU (04 de octubre)	124
4.2.5. C4CU (04 de octubre)	126
4.2.6. CB (día típico)	129
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	131
5.1. Contribuciones	131
5.2. Comprobación de hipótesis y objetivos	131
5.3. Futuras investigaciones	133
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
CAPÍTULO 7. APÉNDICE	146
APÉNDICE A. Datos de Data Loggers	146
APÉNDICE B. Datos climáticos y PET del día típico	148

APÉNDICE C.....	149
APÉNDICE D. Mapas horarios PET en el escenario C1CU (04 de octubre) ...	154
APÉNDICE E. Mapas horarios del PET con el día típico en CB (01 de agosto)	
.....	166

I. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Casos de estudio	9
Tabla 2. Ocurrencia de UHI en el contexto urbano por varias causas	26
Tabla 3. Propiedades térmicas de los materiales de construcción comunes	30
Tabla 4. Características de la vegetación utilizada en la literatura.....	34
Tabla 5. Características y códigos de árboles.....	35
Tabla 6. Esquema de clasificación de las características físicas de los árboles ..	39
Tabla 7. Rangos de Temperatura Fisiológicamente Equivalente (PET).....	42
Tabla 8. Temperatura Media Radiante y PET	43
Tabla 9. Rango UTCI y nivel de estrés térmico correspondiente.	45
Tabla 10. Datos utilizados en ENVI-met	48
Tabla 11. Resumen de ventajas y limitaciones del programa ENVI-met como herramienta potencial de simulación.....	48
Tabla 12. Proceso metodológico de la investigación	55
Tabla 13. Variables de estudio.....	57
Tabla 14. Constantes de estudio.....	57
Tabla 15. Características de la vegetación para utilizar en la simulación	75
Tabla 16. Escenarios de simulación numérica.....	76
Tabla 17. Resumen de parámetros de configuración y entrada de área para simulación validada.....	79

II. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. (a) Modelo para la simulación en ENVI-met en 2D y 3D (b) Segundo escenario modelo de diseño urbano en el mismo sitio.....	12
Figura 2. a) Distribución de temperatura antes de las intervenciones y después de las intervenciones, b) Tabla de comparación de escenarios.....	13
Figura 3. (a) El distrito residencial (resaltado en marrón) de tamaño 184 m x 200 m; (b) Descripción de escenarios donde interviene la vegetación; (c) Ejemplos del índice de aislamiento de paisajismo F_i para diferentes diseños de árboles; (d) Diagrama esquemático del índice de desviación del paisajismo.....	14
Figura 4. Cambios de superficies en las áreas de Dongxihu de Wuhan, en el período de 1989 a 2017	15
Figura 5. Variación espacial de la temperatura fisiológica equivalente (PET) a la altura del peatón (2,00 m) para las áreas simuladas en febrero a las 14 h 00 donde a es Kariakoo, b es el centro de la ciudad, c es Manzese y d es Upanga; e es la temperatura equivalente fisiológica media temporal (PET) para las áreas simuladas, es decir, el centro de la ciudad, Kariakoo, Manzese y Upanga.....	16
Figura 6. Configuraciones de vegetación más eficaces	17
Figura 7. Configuraciones según el tipo de vegetación y arreglo.....	18
Figura 8. Valores UTCI promedio por hora para para diferentes diseños y formas de copas de árboles.....	19
Figura 9. Área de investigación modelada en ENVI-met.....	20
Figura 10. Área de estudio donde fue implementada la vegetación como estrategia para mejorar el confort térmico en la revisión de artículos del Estado del Arte.....	22
Figura 11. Clasificación Köppen-Geiger de los lugares donde fueron implementados los estudios.	23
Figura 12. Índice de confort térmico utilizado en los artículos.....	24
Figura 13. Tipo de vegetación implementada en los estudios	25

Figura 14. Comparación de la temperatura radiante media en áreas de estudio de caso simuladas entre las 12:00 y las 15:00	28
Figura15. Estrategias y procesos de mitigación del efecto de isla de calor urbano	32
Figura 16. Índice de área foliar (método del ceptómetro) en tres ubicaciones dentro de la sombra del árbol para cada tipo de superficie	37
Figura 17. Método de escaneo láser terrestre para calcular el LAD	39
Figura 18. Porcentaje de uso de índices de confort térmico exterior	40
Figura 19. Escala de sensación térmica del índice PMV	44
Figura 20. Resumen de la caracterización metodológica del estudio	54
<i>Figura 21. Diagrama de “Análisis de los patrones del paisaje” con desglose de variables.....</i>	<i>56</i>
Figura 22. Sistema de agrupación bioclimática local	59
<i>Figura 23 Comportamiento mensual de las temperaturas máximas, media y mínimas frente a la ZC del modelo de Auliciems y Szokolay</i>	<i>60</i>
Figura 24. Comportamiento anual de la HR según los límites inferior (30,0 %) y superior (70,0 %) del confort hídrico	61
Figura 25. Comportamiento mensual de las HR mínima, media y máxima, frente a la ZC permisible que acepta un rango del 30,0 % al 70,0 %.....	62
Figura 26. Comportamiento mensual de las RSg, RSb y RSd máximas promedio respecto a los niveles aceptables de Radiación Solar —para aprovechamiento de energía renovable—.....	63
Figura 27. Desglose detallado del comportamiento de viento a lo largo del año a partir de su dirección, intensidad y periodo. Promedios mensual y anual del viento dominante y reinante durante el periodo observado, 2000-2019	64
Figura 28. Rosa anual de vientos dominantes y reinantes. Procedencia del viento a partir de promedios anuales por dirección	65

Figura 29. Diagrama metodológico general de la investigación	66
Figura 30. a) Plano de la fachada principal del prototipo de casa de interés social de Urbi “Villa Residencial”, b) Fotografía tomada en el área de estudio	67
Figura 31. Imagen de unidad de análisis de Landsat 8 con sensor OLI/TIRS combinado.....	68
Figura 32. a) Data Logger, Marca HOBO, b) Protector, Marca Acurite	68
Figura 33. HOBO U12-006 data logger	69
Figura 34. Ubicación de Data Loggers en casa-habitación del área de estudio ...	70
Figura 35. a) Gráfico de ajuste del dato monitoreado y el simulado el día 4 de octubre del 2020 a escala peatonal (1,50 m) en el área de estudio, b) Datos de mínima, máxima y la media	72
Figura 36. Comportamiento térmico horario de agosto	74
Figura 38. Patrones de plantación de árboles.....	77
Figura 39. Ajustes del dominio del modelo	78
Figura 40. Módulos de trabajo de ENVI-met	80
Figura 41. a) Modelo creado en módulo 3D view “Spaces” en ENVI-met, b) Vista del modelo en apartado vegetation del módulo “Spaces” en ENVI-met.....	81
Figura 42. Caracterización de los árboles de sombreado en módulo “Albero”	82
Figura 43. a) Pantalla de inicio para cargar proyecto de ENVIGuide, b) Introducción de datos microclimáticos.....	83
Figura 44. Pantalla inicial para cálculo de confort en BioMet.....	84
<i>Figura 45. Diagrama general sobre el “Análisis y la Evaluación de los patrones del paisaje”</i>	<i>85</i>
Figura 46. Módulo Leonardo para el análisis mediante mapas térmicos.	86
Figura 47. Ubicación del monitoreo en el modelado del CB en 3D view de Spaces ENVI-met.....	88

Figura 48. Escenarios modelados en el software ENVI-met, para analizar el confort térmico a través de configuraciones de vegetación (Imágenes elaboradas a través de módulo Spaces)	89
Figura 49. Gráficos boxplots de comparación de la Temperatura del Aire (°C), Humedad Relativa (%), Temperatura Media Radiante (°C) y PET (°C)	¡Error!
Marcador no definido.	
Figura 49. a) Análisis de comparación de la Temperatura del aire registrada en la simulación a distintas horas, b) Análisis de comparación de medias de temperatura del aire	90
Figura 50. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura del Aire a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario CB a 1.50 m, simulado en ENVI-met.....	92
Figura 51. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura del Aire a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C1CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met	93
Figura 52. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura del Aire a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C2CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met	94
Figura 53. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura del Aire a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C3CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met	95
Figura 54. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura del Aire a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C4CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met	96
Figura 55. a) Análisis de comparación de la Humedad Relativa registrada en la simulación a distintas horas, b) Análisis de comparación de la media de H.R.....	97
Figura 56. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Humedad Relativa a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario CB, simulado en ENVI-met	99

Figura 57. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Humedad Relativa a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C1CU, simulado en ENVI-met	100
Figura 58. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Humedad Relativa a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C2CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.....	101
Figura 59. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Humedad Relativa a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C3CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.....	102
Figura 60. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Humedad Relativa a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C4CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.....	103
Figura 61. a) Análisis de comparación de la Temperatura Media Radiante registrada en la simulación a distintas horas, b) Análisis de comparación de medias de Temperatura Media Radiante.....	104
Figura 62. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura Media Radiante a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario CB a 1.50 m, simulado en ENVI-met	106
Figura 63. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura Media Radiante a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C1CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met	107
Figura 64. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura Media Radiante a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C2CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met	108
Figura 65. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura Media Radiante a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C3CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met	109

Figura 66. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura Media Radiante a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C4CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met	110
Figura 67. a) Análisis de comparación de la Velocidad del viento registrada en la simulación a distintas horas, b) Análisis de comparación de medias de la Velocidad del viento.....	112
Figura 68. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Velocidad del viento a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario CB a 1.50 m, simulado en ENVI-met	114
Figura 69. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Velocidad del viento a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C1CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.....	115
Figura 70. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Velocidad del viento a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C2CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.....	116
Figura 71. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Velocidad del viento a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C3CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.....	117
Figura 72. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Velocidad del viento a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C4CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.....	118
Figura 73. a) Análisis de comparación del índice PET registrado en la simulación a distintas horas, b) Análisis de comparación de medias del índice PET	119
Figura 74. Comparación de PET horario entre escenario CB y C1CU.....	121
Figura 75. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar el índice PET a las 06 h 00 y 15 h 00 en el escenario C1CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.....	121
Figura 76. Comparación de PET horario entre escenario CB y C2CU.....	122

Figura 77. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar el índice PET a las 06 h 00 y 15 h 00 en el escenario C2CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.....	123
Figura 78. Comparación de PET horario entre escenario CB y C3CU.....	125
Figura 79. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar el índice PET a las 06 h 00 y 15 h 00 en el escenario C3CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.....	126
Figura 80. Comparación de PET horario entre escenario CB y C4CU.....	127
Figura 81. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar el índice PET a las 06 h 00 y 15 h 00 en el escenario C4CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.....	128
Figura 82. Mapas térmicos del día típico (1 de agosto) para comparar la Temperatura del Aire a las 06 h 00 y 15 h 00 en el escenario CB	129

III. LISTADO DE ABREVIATURAS, CARACTERES Y SIMBOLOS

Isla de calor urbana	UHI
Isla del parque frio	PCI
Gases de efecto invernadero	GEI
Temperatura fisiológicamente efectiva	PET
Voto Medio Predicho	PMV
Índice universal del clima térmico	UTCI
Índice de dosel bruto	GCI
Índice de capa de hojas	LLI
Índice de volumen de copa	CVI
Índice de dosel total	TCI
Índice del área de la hoja	LAI
Área de densidad de la hoja	LAD
Índice de vegetación mejorada	MODIS EVI
Temperatura de la superficie de la Tierra	LST
Humedad Relativa	H.R.
Temperatura del Aire	Tair
Temperatura radiante media	Tmrt
Factor de vista del cielo	SVF
Temperatura máxima	Tmax
Temperatura neutra	Tn
Temperatura media	Tm
Temperatura mínima	Tmin
Temperatura máxima extrema	Tmax ext.
Temperatura mínima extrema	Tmin ext.
Zona de confort	ZC
Zona de confort inferior	ZCi
Zona de confort superior	ZCs
Humedad relativa media	HRmed
Humedad relativa mínima	HRmin
Humedad relativa maxima	HRmax
Radiación solar toral	RSg
Radiación solar directa	RSb
Radiación solar difusa	RSd
Error cuadrático medio	RMSE
Error absoluto medio	MAE

INTRODUCCIÓN

Es de importancia resolver los problemas climáticos y ambientales de las ciudades. El deterioro del microclima urbano impacta negativamente en el confort térmico de los habitantes de la ciudad (Xiong et al., 2020). La rápida urbanización y el cambio climático global han transformado la sociedad humana de muchas formas (Darvish et al., 2021). Según informes de las Naciones Unidas, más del 50% de la población mundial vive en una zona urbana y los problemas ambientales derivados de las actividades que se realizan aquí, están ganando atención debido a sus impactos en la salud y el bienestar humanos (Sekhar et al., 2020; Tumini, 2012). La naturaleza física del entorno urbano construido da lugar a la Isla de Calor Urbana (UHI), provocando diferencias de temperatura de hasta 8 °C entre las ciudades y sus áreas suburbanas y rurales circundantes, lo que hace que muchas ciudades se sientan térmicamente incómodas con frecuencia en el verano (Speak et al., 2020; Perini et al., 2017).

Los investigadores que estudian los entornos urbanos han explorado una amplia gama de estrategias para enfriar el entorno urbano al aire libre y así mejorar el confort térmico, como la vegetación. La presencia de vegetación (es decir, sistemas de vegetación vertical, jardines en el techo y cobertura de árboles) como una estrategia pasiva eficiente puede influir en la función microclimática (Darvish et al., 2021), varias metodologías confirman que pueden mejorar el confort térmico humano y disminuir el potencial de deterioro de la salud de las poblaciones urbanas (Abreu-Harbach et al., 2015). Si la pérdida de vegetación causa el UHI, agregar vegetación a las áreas urbanas podrían potencialmente reducir su magnitud, por lo que se necesita investigación para cuantificar los efectos de enfriamiento de la vegetación urbana (Armson et al., 2012).

En particular, los árboles y su rendimiento de enfriamiento se han investigado en detalle (Zhang et al., 2020). Los árboles con diferentes características morfológicas, incluida la altura, el ancho de la copa y la densidad de las hojas, tienen efectos variables sobre el ambiente térmico (Speak et al., 2020). Las copas de los árboles pueden modificar los ambientes microclimáticos debido a la reflexión, transmisión y

absorción de la radiación solar y controlan la velocidad del viento (Abreu-Harbach et al., 2015). La efectividad del sombreado generado por los árboles para la mejora del confort térmico disminuye con el aumento de la profundidad de los espacios urbanos, es decir, cuando la proporción entre la altura de los edificios y la anchura de las calles es mayor (Azcarate-Mutiloa et al., 2019).

El presente documento explora la influencia de la vegetación en el microclima para aportar datos recientes de este método como estrategia para mejorar el confort térmico exterior de los peatones en la ciudad de Ensenada, Baja California, México. El experimento se desarrolla en el área residencial San Sebastián, Fraccionamiento del Sol, 22820 dentro del centro de población, donde fueron instalados Data Logger para el registro de temperatura y humedad del sitio.

Posterior a la recuperación de datos climáticos, se llevó a cabo una simulación en el software "ENVI-met", para analizar el emplazamiento de la vegetación (*Cupressus forbesii*) en diferentes configuraciones con árboles individuales y agrupados; y así producir patrones de sombreado, que a su vez generen un efecto de enfriamiento que ayude a mejorar el confort térmico del sitio, respondiendo al objetivo general de este trabajo. Específicamente, se realizó un modelo de microclima tridimensional en el software ENVI-met, para calcular los parámetros microclimáticos exteriores y el índice de temperatura fisiológica equivalente (PET) como una medida de análisis de la condición de confort térmico exterior.

La investigación se conforma de cinco capítulos, en el primer capítulo se tratan temáticas relacionadas al planteamiento del problema y justificación. En el segundo capítulo presentan los antecedentes y el Marco teórico donde se define el origen de la UHI, el enfriamiento por medio de vegetación y los métodos de estudio del confort térmico en exteriores. El tercer capítulo corresponde a la metodología, donde se describe la caracterización del estudio, el área de estudio, la unidad de análisis, monitoreo, la caracterización de la vegetación y la simulación. En el capítulo cuatro se presentan los resultados de la investigación y la discusión sobre ellos. Por último, en el capítulo cinco se exponen las conclusiones o resoluciones generadas a partir de los resultados.

CAPÍTULO 1.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente capítulo abarca temáticas referentes a la urbanización como modificador del microclima, creando fenómenos como la isla de calor urbana, la cual eleva las temperaturas y trae consigo problemas de confort térmico en las ciudades.



CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ciudad actúa como un factor modificador importante del clima local y crea condiciones medioambientales concretas que podemos definir como microclima urbano. La diferencia de condiciones microclimáticas de los espacios urbanos frente a las de las zonas rurales es una de las consecuencias producidas por el conjunto urbano (Tumini, 2012), lo que resulta en distintas magnitudes de UHI (Speak et al., 2020). El efecto isla de calor se ha documentado en cientos de ciudades de todo el mundo. La intensa investigación que se ha llevado a cabo sobre el tema, proporciona una documentación completa del problema y una comprensión profunda de sus características (Santamouris et al., 2011).

Los factores que exacerban el impacto de la UHI incluyen la presencia de superficies urbanas con bajo albedo, el uso de materiales con alta capacidad térmica en los edificios, ventilación inadecuada y atrapamiento de radiaciones de onda larga, contaminación del aire, falta de vegetación y, en consecuencia, reducción de la evaporación en el medio urbano (Abdi et al., 2020). 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), 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 cálidos. Se ha reconocido que la vida humana y el bienestar general son afectados por factores ambientales microclimáticos (Srivani et al., 2020).

El caso de la ciudad de Ensenada no es la excepción, la doctora María Tereza Cavazos Pérez, especialista en climatología del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), en octubre del 2018, explica 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. En el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California (PEACC-BC), se muestra las proyecciones de cambios de temperatura en la ciudad de Ensenada hasta el 2100, con respecto al período de 1961-1990. Para esto se evalúan los posibles 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 para los 2020s, tendría los mayores incrementos. En los meses de febrero y mayo se presentarían incrementos entre 1.1 °C y 1.3 °C. Para los 2050s, el incremento máximo en la temperatura mínima media sería de 1.8 °C con el escenario A2 en el mes de febrero. Finalmente, para los 2080s, 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 (Otazo et al., 2012).

1.1. Justificación

Para ayudar a los habitantes de las ciudades a adaptarse mejor a los posibles efectos del calentamiento global, las UHI y para mejorar el confort térmico en los espacios abiertos urbanos, se han propuesto y evaluado numerosas estrategias de diseño (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). Se han implementado varias estrategias de mitigación para reducir el UHI, sin embargo, Aflaki y Nuruzzaman declararon que la vegetación urbana es la estrategia más efectiva (Wonorahardjo et al., 2020). La investigación científica ha proporcionado modelos sobre la capacidad de la vegetación para mitigar el calor urbano. Estos incluyen el monitoreo y la evaluación del impacto con la selección de especies de vegetación más eficientes (Santamouris et al., 2018).

La vegetación tiene efectos en el mejoramiento del confort térmico, ya que puede modificar la temperatura del aire, aumentar la humedad del aire, reducir la velocidad del viento, absorber los contaminantes del aire, regular procesos hidrológicos (Streiling et al., 2003; Luna et al., 2004). Mediciones basadas en el campo, revelaron que las áreas verdes usualmente son más frías que las áreas circundantes, lo que lleva a una diferencia de temperatura de 1 °C a 7 °C y la formación de un fenómeno conocido como la "isla de parque fresco" (Jamei et al., 2016). Tal regulación térmica proporcionada por la vegetación como estrategia pasiva, puede conducir a ahorros considerables de energía (Rivera-Gómez et al., 2019).

En particular, los árboles y su rendimiento de enfriamiento se han investigado en detalle (Zhang et al., 2020), pueden proporcionar protección a las viviendas y a peatones contra la luz solar directa y reducir la temperatura mediante el proceso de evapotranspiración. Su papel principal es que la luz solar sea interceptada para bajar la temperatura del aire mediante el sombreado y mejorar la calidad del aire manteniendo los edificios relativamente frescos (Nuruzzaman, 2015). 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). Estos efectos integrados pueden evaluarse mediante índices térmicos como el PET (Lai et al., 2019).

La mejora del nivel de confort exterior impacta a una ciudad en varios aspectos, por ejemplo, el fomento del ciclismo y la marcha, atraer a más personas a zonas de confort en la ciudad y, por otro lado, aumentar el potencial comercial y turístico de la zona (Perini et al., 2017).

1.2. Objetivos de investigación

1.2.1. Objetivo general

Determinar la configuración de árboles, que genera un mayor efecto de enfriamiento mediante el sombreado para mejorar el confort térmico exterior en el área de estudio.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Analizar el área de estudio a través de factores meteorológicos, la geometría urbana y la vegetación existente, que describan la situación actual del sitio.
2. Caracterizar una especie de vegetación y determinar el potencial de sombreado.
3. Estimar y analizar niveles de confort térmico con las configuraciones de vegetación propuestas.
4. Establecer efectos de enfriamiento a partir de las configuraciones propuestas con vegetación en ENVI-met y comparar tales efectos entre escenarios.

1.3. Pregunta de investigación

¿Qué configuración de vegetación proporciona un mayor efecto de enfriamiento en el área residencial Villas del Cedro, de la ciudad de Ensenada?

1.4. Hipótesis

Los espacios urbanos abiertos muestran cierta morfología, materiales y usos de suelo, características que tienen gran influencia en el comportamiento microclimático, siendo la temperatura uno de los principales elementos afectados. La ciudad de Ensenada no está exenta a presentar estos factores.

Una configuración de vegetación en un modelo de simulación de ENVI-met, para la cual se tomarán como constante los factores meteorológicos, la geometría urbana y la especie de vegetación, donde la variable de estudio es el efecto de enfriamiento, que dependerá de la calidad del sombreado proporcionada por el emplazamiento de la vegetación; dará un efecto de enfriamiento que equivaldrá a una mejora en el confort térmico del área de estudio. Tales resultados, demostrarán lo siguiente:

a) Una configuración dispersa de árboles, con dosel grande y una hoja de mayor tamaño, presenta la suficiente calidad de sombreado, representando una disminución en la temperatura del aire y de las superficies en los alrededores inmediatos.

b) Las alteraciones microclimáticas que la urbanización provoca, impactan en el confort térmico de espacios abiertos.

CAPÍTULO 2.

ANTECEDENTES

El análisis de antecedentes, es una sección comparativa de casos de estudio para detectar tendencias, métodos, variables y hallazgos durante los últimos años. La presente sección contiene las consideraciones teóricas que se utilizaron como base para el planteamiento de la investigación. Desde el origen de la UHI, las diferentes estrategias de mitigación de la UHI y el sustento del ¿Por qué la selección de la vegetación como estrategia de mitigación?, específicamente los árboles de sombreado y sus características.



CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

Para el análisis de los casos de estudio, se realizó la Tabla 1, donde se puede visualizar el año, autor, la ciudad, temperatura general de la ciudad, las variables utilizadas y el área donde se han implementado los estudios. Existen diversos métodos e instrumentos para detectar y estudiar el impacto de la vegetación en el confort térmico, dependiendo del lugar y del objetivo que se quiera lograr. Para este análisis de antecedentes fue necesario limitar la revisión a casos de estudio que realizaron monitoreo en campo o utilizaron un programa de simulación como ENVI-met, creado por Michael Bruse, para analizar propuestas o simulaciones a partir de una configuración espacial de un área verde dentro de un microclima.

Se puede resaltar que las variables analizadas en las investigaciones son distintos índices de confort térmico como la Temperatura Fisiológicamente Efectiva "PET" y el voto medio previsto "PMV"; características de la vegetación como el emplazamiento, altura y el diámetro de la corona; y variables asociadas al microclima, como temperatura media radiante, temperatura del aire y humedad relativa.

Tabla 1. Casos de estudio

Año	Autor	Ciudad	Temp. General	Área de estudio	Variables	Estudio
2019	Gui et al.	Wuhan, China.	1 °C a 33 °C.	Área rural y área urbanizada.	MODIS EVI (Índice de Vegetación Mejorada) y LST (Temperatura de la Superficie de la Tierra)	En campo
2019	Makinde et al.	Akure, Nigeria	18 °C a 31 °C.	Área rural y área urbanizada.	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI)	En campo
2020	Ouali et al.	Cuatro ciudades de Marruecos:	a) <i>Er-Rachidia</i> . - 3 °C a 38 °C , b) <i>Rabat</i> . - 8 °C a 27°C, c) <i>Tiflet</i> . - 5	Áreas residenciales (Cañón Urbano)	Diseño del paisaje, PMV (Voto medio)	Software (ENVI-met)

		Er-Rachidía, Rabat, Tiflet, Marrakech	°C a 32 °C, d)Marrakech.- 6 °C a 38 °C.		previsto), clima y localización, indicadores morfológicos	
2019	Rui et al.	Nanjing, China	6 °C a 32 °C.	Área residencial (Cañón Urbano)	Voto medio predicho (PMV), Temperatura radiante media (MRT)	Software (ENVI-met)
2018	Yahia et al.	Dar es Salaam, Tanzania	20 °C a 32 °C.	Morfología de área urbana a nivel de calle (edificios bajos, medios y de gran altura)	Factor de vista del cielo (SVF), temperatura efectiva fisiológica (PET)	Software (ENVI-met)
2018	Ren et al.	Changchun, China.	-20 °C a 27 °C	Bosque Urbano	Índice de área foliar, altura, corona de cierre, área basal.	En campo
2018	Antoniadis et al.	Volos, Grecia	4 °C a 30 °C.	Patio de la escuela	PET (temperatura efectiva fisiológica)	Software (ENVI-met)
2018	Yilmaz et al.	Erzurum, Turquía.	.-16 °C a 27 °C.	Jardín botánico y centro de la ciudad	Voto medio previsto (PMV), altura y tipo de árbol, ubicación.	Software (ENVI-met)
2018	Zhao et al.	Arizona, Phoenix	7 °C a 41 °C.	Área residencial dentro de la zona metropolitana	PET (temperatura efectiva fisiológica), Temperatura media radiante, Humedad relativa, velocidad del viento, temperatura del aire	Software (ENVI-met)
2018	Stocco et al.	Mendoza, Argentina	3 °C a 31 °C	Plazas verdes urbanas	Temperatura media radiante, estructura del árbol, Temperatura del aire.	Software (ENVI-met)

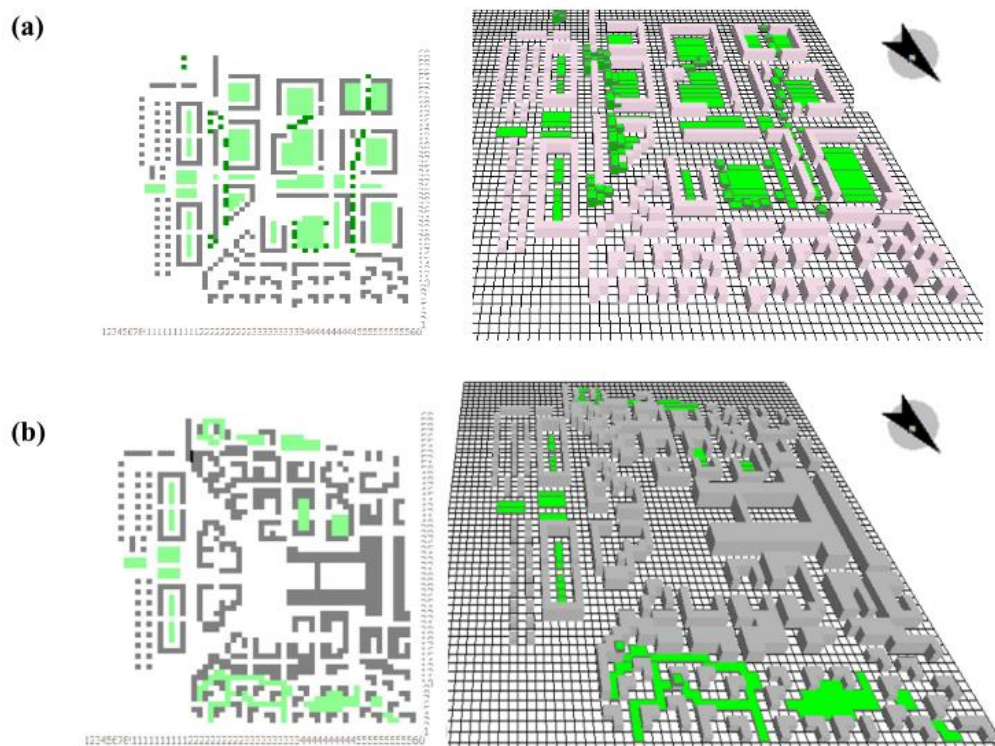
2018	Soudoudi et al.	Berlín, Alemania	-2 °C a 25 °C.	Antiguo aeropuerto (actualmente parque de zona urbana)	Isla del parque frío (PCI), temperatura efectiva fisiológica (PET)	Software (ENVI-met)
2017	Milošević et al.	Novi Sad, Serbia	-3 °C a 29 °C.	Estacionamientos y aceras	Geometría de la calle, localización del árbol, Índice Universal del Clima Térmico (UTCI).	Software
2016	Fabbri et al.	Bologna, Italia	-0 °C a 31 °C.	Cañon Urbano	Voto medio predicho (PMV), la temperatura efectiva fisiológica (PET), el Índice Universal de Clima Térmico (UTCI)	Software (ENVI-met, Ladybug, ENVI-BUG)
2013	Kaniewski et al.	Acre, Israel	10 °C a 31 °C.	Zona urbana costera	Índices de diversidad (Margalef y Shannon), precipitación, temperaturas.	Software (ENVI-met)
2012	Acero et al.	Bilbao, España	5 °C a 24 °C.	Aeropuerto (área rural) y Feria (área urbana)	Anomalía de temperatura máxima por hora, isla de calor urbana (UHI), isla fría urbana (UCI)	En campo
2007	Spangenberg	Río de Janeiro, Brasil	18 °C a 31 °C	Barrio alrededor de edificio en área urbana	LAD (Área de Densidad de Hoja de plantas), Albedo	Software (ENVI-met)

Ouali et al., (2020), realizaron un estudio en cuatro ciudades de Marruecos: Errachidía, Rabat, Tiflet y Marrakech. El objetivo de este trabajo fue evaluar en el software ENVI-met, dos escenarios en base a los parámetros ecológicos y al nivel de

confort de los peatones, en diferentes zonas bioclimáticas de Marruecos, durante el invierno y el verano, para mostrar parámetros ecológicos como criterios de decisión de diseño urbano. Los sitios de intervención fueron distintas áreas residenciales, específicamente en cañones urbanos (Figura 1), donde los tres tipos de árboles más presentes se agregan a la base de datos de vegetación de Envi-met para este estudio (LAD=2) y césped de 50 cm promedio.

La correlación cruzada de los resultados de la simulación de microclima 3D y los indicadores morfológicos permitió deducir que la nubosidad, latitud, sombreado, vegetación y compactidad tienen un efecto significativo en la temperatura media radiante (T_{mrt}), pero este efecto difiere de verano a invierno. Las disparidades entre los dos escenarios de diseño urbano se notan también para la zona de clima subhúmedo incluso si los valores promedio de PMV indican -0,8 y -0,4 respectivamente en invierno y 1,1 y 1,8 en verano.

Figura 1. (a) Modelo para la simulación en ENVI-met en 2D y 3D (b) Segundo escenario modelo de diseño urbano en el mismo sitio.



Nota. Obtenido de " Analysis of Open Urban Design as a tool for pedestrian thermal comfort enhancement in Moroccan climate Kaoutar" por Ouali et al., (2020), Journal of Building Engineering, 28 (101042).

Fabbri et al., (2017), analizaron en el software ENVI-met, distintos índices de confort térmico: el UTCI, PET y PMV. El estudio de caso se refiere a un área específica ubicada en Bolonia, Italia y describe la condición del cañón creada por algunos bloques de construcción en un distrito de vivienda social. En la investigación se concluye, en que el software ayuda a proporcionar una retroalimentación predictiva sobre las soluciones previstas con referencia al confort térmico exterior. Las intervenciones implementadas incluyen el uso de vegetación, principalmente árboles de gran altura y muestran una disminución del área de malestar (Figura 2).

Figura 2. a) Distribución de temperatura antes de las intervenciones y después de las intervenciones, b) Tabla de comparación de escenarios

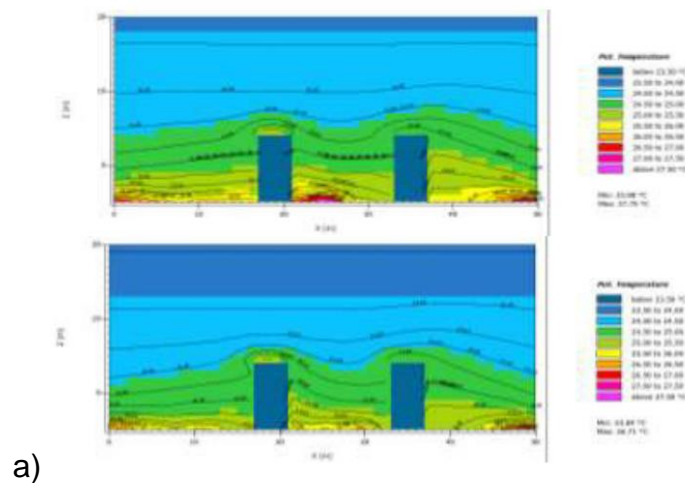


Table 1: Central Values of Urban Canyon Section: Scenarios comparison

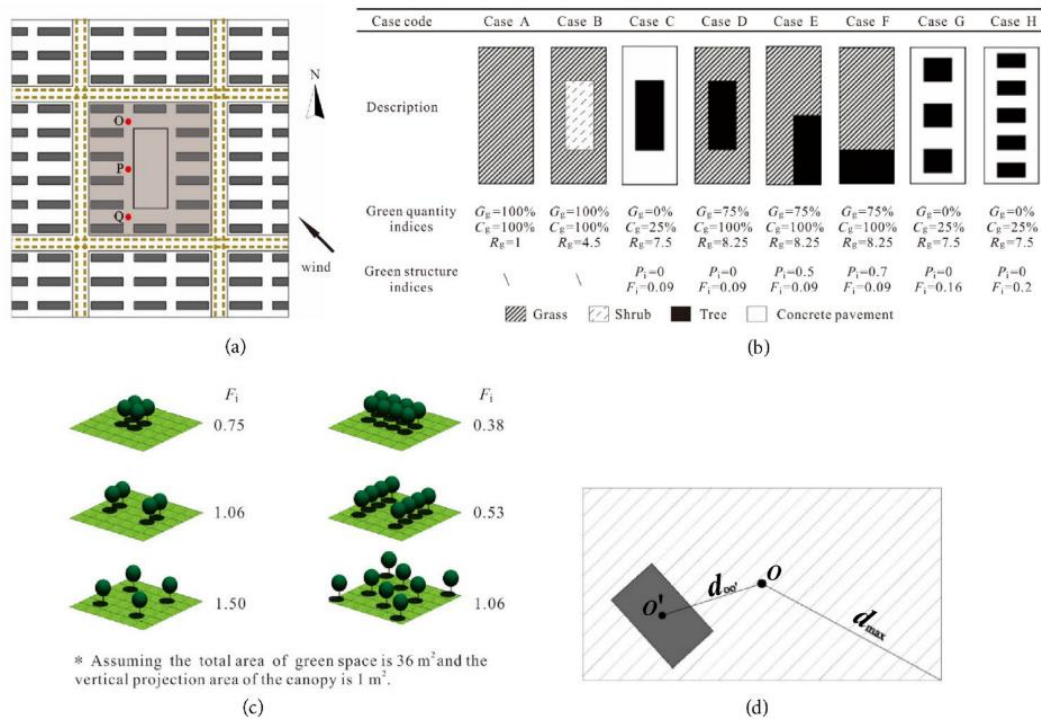
status	Temperature (°C) (min-max)	Wind Speed (m/s) (min-max)	Relative Humidity (%)(min-max)	Mean Radiant Temperature (°C) (average value)	PMV (average value)
Before intervention	23.98 – 27.75	0.09 – 2.76	57.59 – 76.20	65.56	0.34
b) After intervention	23.84 – 26.71	0.09 – 2.76	57.50 – 75.73	46.43	-0.63

Nota. Obtenido de "Outdoor Comfort: The ENVI-BUG tool to Evaluate PMV Values Output Comfort Point by Point" por Fabbri et al., (2017), Energy Procedia, 111 (510–519).

Rui et al., (2019), en la ciudad de Nanning, China, realizaron un estudio en un distrito típico que representa las estadísticas del tamaño del edificio residencial y el ancho de la calle de Nanjing (Figura 3). Los resultados mostraron, que durante el período más caluroso se incrementa el efecto de enfriamiento de los árboles, disminuyendo la temperatura promedio de la calle en el distrito residencial. En general,

la vegetación tiene un gran efecto en la mejora del confort térmico. El PMV alrededor de los edificios puede alcanzar más de 3,5, mientras que al implementar hierba, arbustos y árboles se puede reducir el PMV a 2,5, 2,0 y 0,0, respectivamente. El efecto de enfriamiento que mostró la vegetación, los árboles en particular, se maximizó dentro de los cañones de las calles.

Figura 3. (a) El distrito residencial (resaltado en marrón) de tamaño 184 m x 200 m; (b) Descripción de escenarios donde interviene la vegetación; (c) Ejemplos del índice de aislamiento de paisajismo F_i para diferentes diseños de árboles; (d) Diagrama esquemático del índice de desviación del paisajismo.

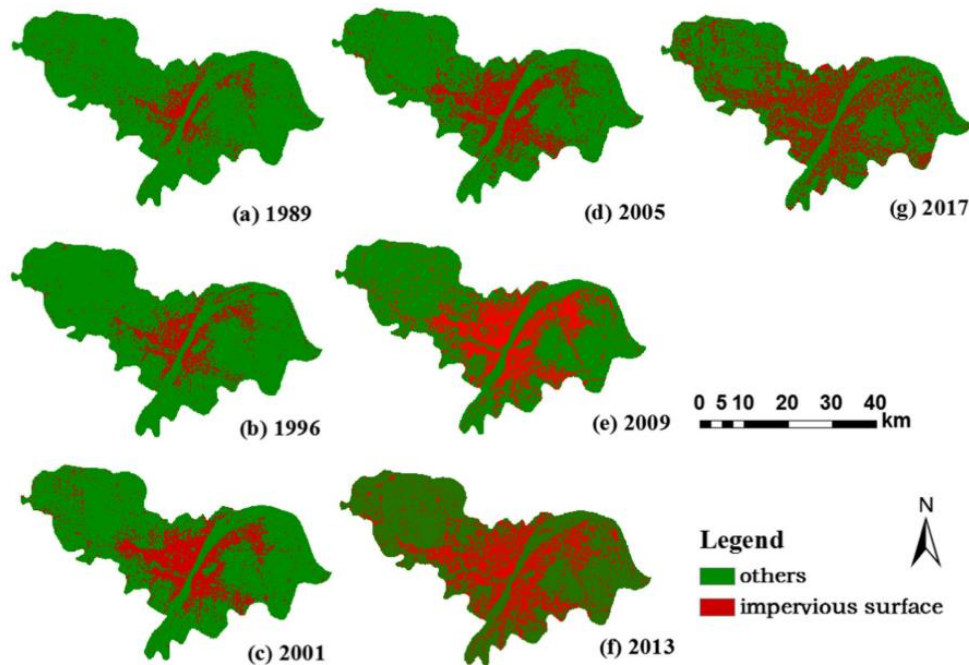


Nota. Obtenido de "Study of the effect of green quantity and structure on thermal comfort and air quality in an urban-like residential district by ENVI-met modelling" por Rui et al., (2019), Building Simulation, 12 (183–194).

Gui et al., (2019), investigaron el proceso de urbanización de Wuhan, China, desde 1989 hasta 2017 basado en datos de Landsat, a través de un análisis de la perturbación de la vegetación y la UHI superficial (Figura 4). Los resultados mostrarán que después de las funciones mejoradas de la vegetación y las estructuras urbanas aumentadas, la urbanización finalmente causó los parches fragmentados y las formas urbanas irregulares. Específicamente, se encontró que el efecto de enfriamiento de la vegetación durante el día era más obvio, y los aumentos en el flujo de calor por las

superficies impermeables durante la noche jugaron un papel dominante. Finalmente, concluye en que las formas de mitigar el efecto UHI a través de la vegetación y el diseño del paisaje deberían recibir un gran interés en ciudades con altas temperaturas.

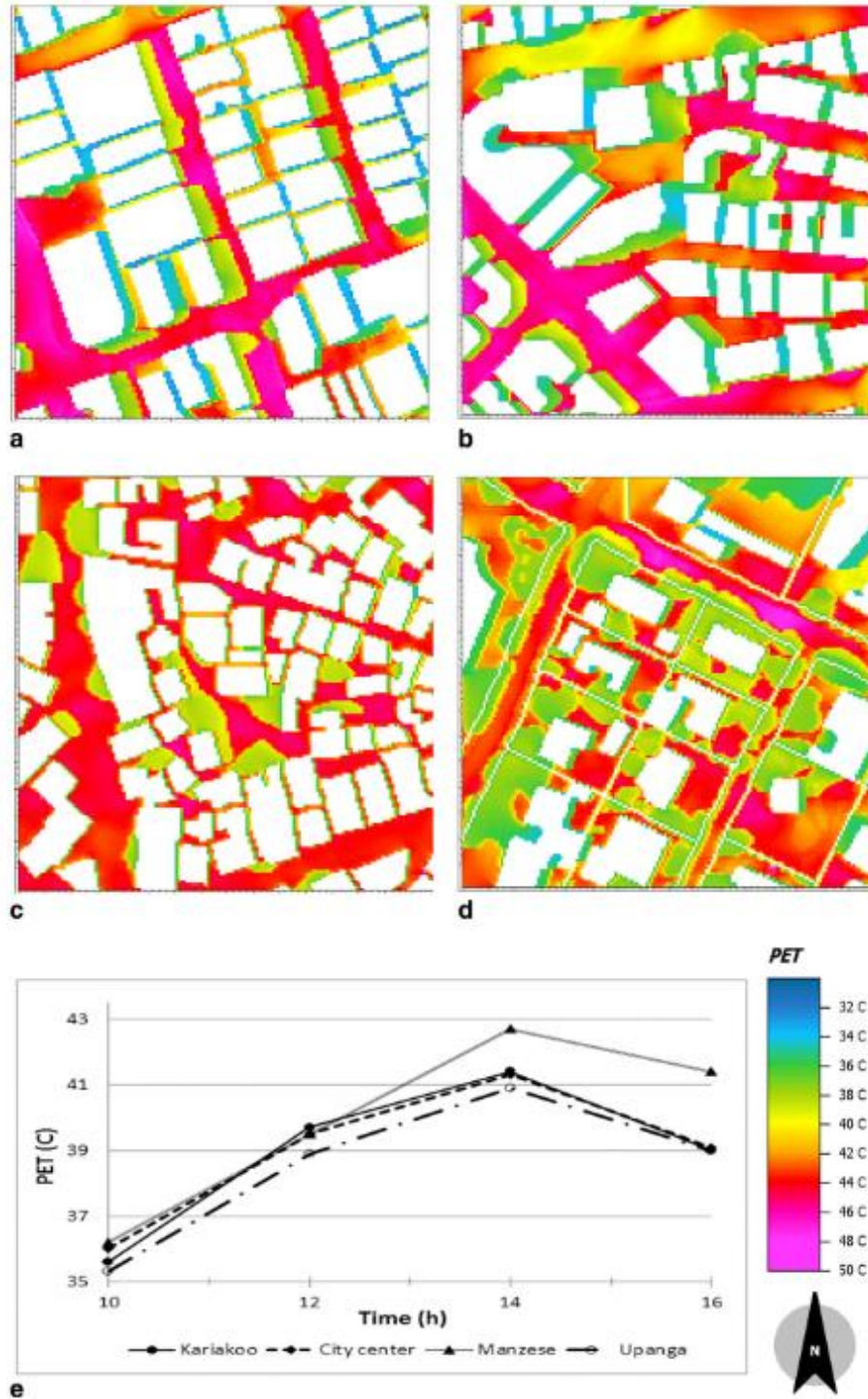
Figura 4. Cambios de superficies en las áreas de Dongxihu de Wuhan, en el período de 1989 a 2017



Nota. Obtenido de “ Investigating the urbanization process and its impact on vegetation change and urban heat island in Wuhan, China” por Gui et al., (2019), Environmental Science and Pollution Research, 26 (30808–30825).

Yahia et al., (2018), realizaron un estudio en Dar es Salaam, Tanzania, donde la mejora del confort térmico se produce principalmente en los lugares donde se añaden árboles (la reducción debajo de los árboles puede llegar a 14 °C PET). El artículo se concentra en los barrios Kariakoo, City Center, Manzese y Upanga, que tienen características claramente diferentes en cuanto a morfología urbana y tipos de edificios Figura 5. La cobertura verde se calculó como el porcentaje del área verde en comparación con el área total estudiada. Los árboles simulados en ENVI-met se diseñaron en base a observaciones y se aplicaron dos densidades de árboles diferentes; árboles densos con 10 m de altura (LAI = 4.73) y árboles muy densos con 15 m de altura (LAI = 9.35), además también se utilizó pasto con 0.1 m de altura (LAI = 0.03).

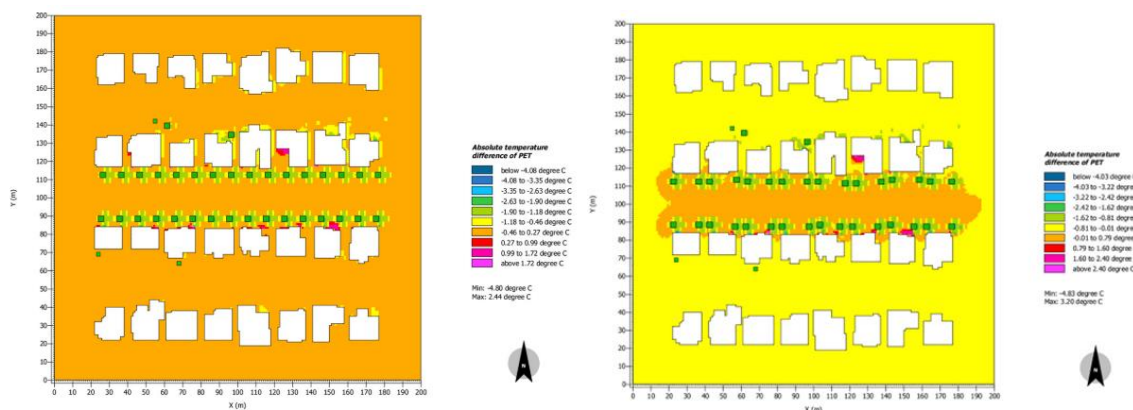
Figura 5. Variación espacial de la temperatura fisiológica equivalente (PET) a la altura del peatón (2,00 m) para las áreas simuladas en febrero a las 14 h 00 donde **a** es Kariakoo, **b** es el centro de la ciudad, **c** es Manzese y **d** es Upanga; **e** es la temperatura equivalente fisiológica media temporal (PET) para las áreas simuladas, es decir, el centro de la ciudad, Kariakoo, Manzese y Upanga



Nota. Obtenido de "Effect of urban design on microclimate and thermal comfort outdoors in warm-humid Dar es Salaam, Tanzania" por Yahia et al., (2018), International Journal of Biometeorology, 62 (373–385).

Zhao et al., (2018), en la ciudad de Phoenix, Arizona, realizaron un estudio publicado para la revista *Urban Forestry & Urban Greening*, donde simularon un área residencial real con la disposición actual de árboles en ENVI-met, para posteriormente evaluar y comparar las diferencias en los microclimas exteriores y el confort térmico humano simulando diferentes diseños (agrupados, de igual intervalo o dispersos) con tres tipos diferentes de árboles en el mismo vecindario Figura 6. Las especies que se utilizaron de árboles con diferente tipo de hoja, ancho de copa y altura del árbol fueron: *Fraxinus velutina* (Fresno del desierto), *Acacia salicina* (Acacia llorona) y *Washingtonia filifera* (Palma del desierto). Basado en la simulación y el análisis del índice PET, una disposición de dos árboles en intervalos iguales proporcionó mayores beneficios de microclima y confort térmico humano en el vecindario debido a la importancia de la sombra en ese ambiente.

Figura 6. Configuraciones de vegetación más eficaces



(a) Two trees equal arrangement scenario vs. no tree scenario. (b) Two trees dispersed arrangement scenario vs. no tree scenario.

Nota. Obtenido de "Impact of tree locations and arrangements on outdoor microclimates and human thermal comfort in an urban residential environment" por Zhao et al., (2018), *Urban Forestry and Urban Greening*, 32 (81–91).

Sodoudi et al., (2018), en la ciudad de Berlin, Alemania, realizaron una investigación publicada en la revista *Urban Forestry & Urban Greening*, donde para aclarar sistemáticamente la correlación entre la configuración espacial y el efecto de enfriamiento de las áreas verdes, se diseñan y simulan 25 escenarios utilizando el programa ENVI-met (Figura 7). Estos 25 escenarios representan áreas verdes con cinco configuraciones espaciales diferentes (área verde integrada, áreas verdes punteadas dispersas, áreas verdes punteadas densas, áreas verdes en forma de

cinturón paralelas a la dirección del viento y áreas verdes en forma de cinturón verticales a la dirección del viento) y cinco vegetación tipos (árboles con copas grandes, árboles con copas pequeñas, setos y arbustos, hierba de 50 cm y hierba de 10 cm). El confort térmico humano de cada escenario se evalúa mediante temperatura fisiológicamente equivalente (PET). Los resultados revelan que el efecto de enfriamiento más alto aparece en el escenario de áreas verdes en forma de cinturón paralelas a la dirección del viento y con grandes copas de árboles.

Figura 7. Configuraciones según el tipo de vegetación y arreglo

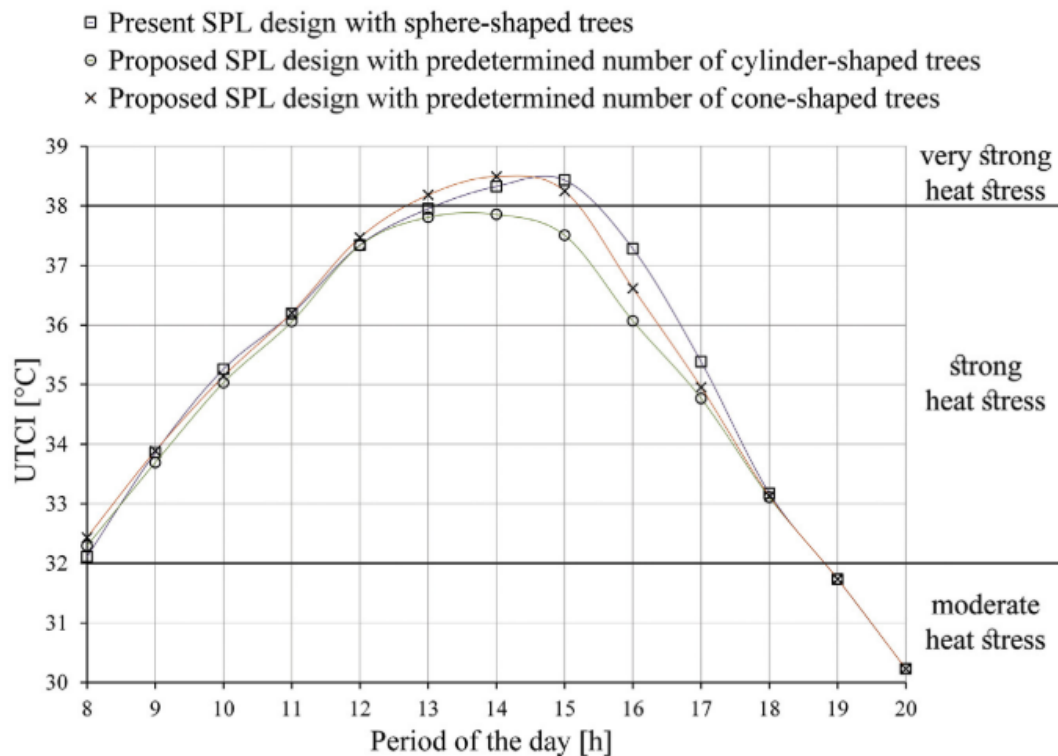
Configuration	50×50m Configuration 1	4×25×25m Configuration 2	16×12.5×12.5m Configuration 3	4×100×6.25m Configuration 4 (W-E)	4×100×6.25m Configuration 5 (S-N)
Vegetation type					
Grass 10cm					
Grass 50cm					
Hedges-Shrubs					
Tree-small canopy					
Tree-big canopy					

Nota. Obtenido de "The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort" por Sodoudi et al., (2018), Urban Forestry and Urban Greening, 34 (85–96).

Milošević et al., (2017), realizaron un estudio en Novi Sad, específicamente en un estacionamiento y aceras, con el objetivo de mejorar el confort térmico al aire libre. La implementación de vegetación consistió en islas de árboles con diferentes formas de copa (esfera, cilindro y cono). Al cambiar la ubicación de un número predeterminado de árboles, se notó una mejora del confort térmico al aire libre en el 77% de todas las ubicaciones del cuerpo con la mayor disminución de UTCI de 3.3 °C en la ubicación

de un solo cuerpo. Además, la reducción del estrés por calor por las copas de los árboles en forma de cilindro demostró ser más pronunciada que las copas de los árboles en forma de esfera y de cono con una reducción de 3.9 °C UTCL en la ubicación de un solo cuerpo. El procedimiento mostró que la ubicación de las islas de árboles y los árboles dentro de ellas, así como las formas de las copas de los árboles, son factores importantes porque influyen en el confort térmico al aire libre (Figura 8).

Figura 8. Valores UTCL promedio por hora para para diferentes diseños y formas de copas de árboles.



Nota. Obtenido de "Influence of changing trees locations on thermal comfort on street parking lot and footways" por Milošević et al., (2017), Urban Forestry and Urban Greening, 23 (113–124).

Spangenberg, (2007), realizaron un estudio en un barrio alrededor de CEFET (Centro Federal de Educacao Tecnológica)/Petrobrás está ubicado en el Municipio de Maracaña en Río de Janeiro. Las simulaciones realizadas en este trabajo, fueron hechas en el software ENVI-met en un día promedio de verano, donde se visualiza que una de las pocas posibilidades para mejorar el bienestar térmico en los espacios externos en las ciudades tropicales, es por los diversos efectos positivos de la vegetación. Fueron implementados distintos escenarios donde la vegetación fue

involucrada, por ejemplo: la situación actual con la pérdida de vegetación, la situación actual con la aplicación de techos verdes, la situación actual con la aplicación de 50% mas árboles, la situación actual con la aplicación de techos verdes y 50% más árboles, entre otros (Figura 9).

Figura 9. Área de investigación modelada en ENVI-met



Nota. Obtenido de "Simulation of urban microclimates in tropical metropolis' maracaná/ rio de janeiro - a case study" por Spangenberg et. al., (2007), Institut für Tropentechnologie ITT, (10).

De acuerdo a la literatura revisada en esta sección, se presentaron distintas características en común. La vegetación que se implementa en los estudios por lo general son árboles, arbustos, pastos o combinaciones entre ellos, sin embargo, la utilización de árboles de sombra ha tomado protagonismo en los artículos. Cabe resaltar, que las configuraciones dispersas con árboles de dosel grande y gran densidad del follaje, tienden a ser las estrategias de mitigación del calor urbano más efectivas. En cuanto el análisis de confort térmico, la mayoría de los artículos utilizaron en ndice PET, en el software ENVI-met.

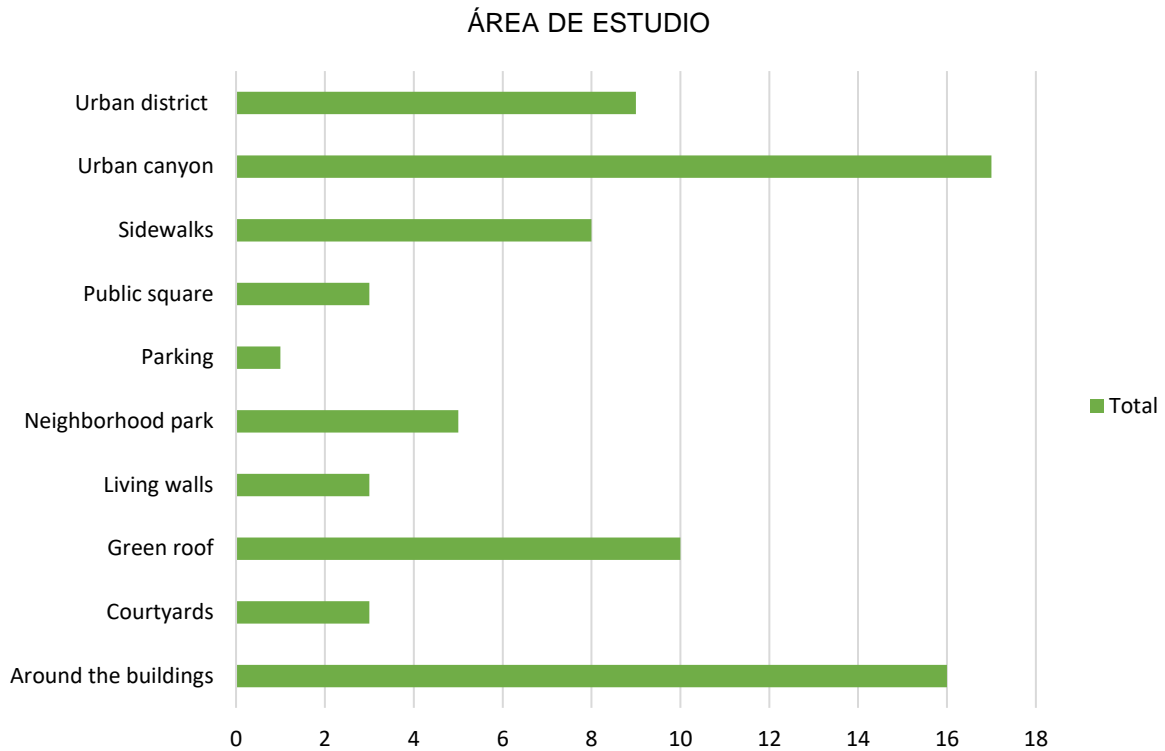
Andoni & Wonorahardjo, (2018) mostraron en su revisión " *A Review on Mitigation Technologies for Controlling Urban Heat Island Effect in Housing and Settlement Areas*", que las áreas comerciales y residenciales son la tercera mayor cantidad de áreas que tienen la temperatura más alta. Significa que la intensidad de la Isla de Calor Urbano en esta área es alta, y es por eso que necesitamos mitigar el UHI en viviendas y asentamientos.

2.1. Estado del Arte

Para realizar esta sección, fue necesario condensar las temáticas principales de la investigación en palabras clave apropiadas para facilitar la búsqueda de información que compartiera las características más importantes con el presente documento, teniendo en cuenta que el área de intervención elegida es el *"área residencial"*. Fue elegida la siguiente categoría de palabras clave relevantes: (Vegetation OR Tree OR Greening OR 'Urban green' OR 'Urban forest') AND ('Urban heat island') AND ('Thermal confort' OR PET OR PMV OR UTCI)(Microclimate) AND (ENVI-met) AND (Residential OR Neighborhood); para proceder a obtener la literatura en la base de datos científica "Scopus". Fueron seleccionados y clasificados 60 artículos, revisados por pares, publicados entre el año 2009 y 2020 en idioma inglés, para analizar aspectos como el índice de confort utilizado, la vegetación, descripción de la simulación, área de implementación y bioclima.

Varios investigadores han estudiado la disposición óptima de la vegetación, al reorganizar la ubicación y área de estudio. Como muestra la Figura 10, en los artículos analizados, fueron identificadas 10 áreas principales de implementación: Distrito Urbano, cañon urbano, aceras, plaza pública, estacionamiento, parque del vecindario, muros verdes, techos verdes, patios y alrededor de los edificios. En la actualidad, la disponibilidad de suelo limitado hace que lo urbano sea diseñado verticalmente y denso. El fenómeno del diseño residencial vertical forma un acantilado de construcción llamado fenómeno de cañon urbano (Firdausah & Wonorahardjo, 2018), el cual ha sido la principal área de estudio de la presente revisión. Seguido se encuentra la implementación de la vegetación en distintos porcentajes alrededor de los edificios y en los techos verdes. En último lugar se encuentran los estacionamientos, lo cual podría representar objeto de futura investigaciones. En el caso del presente estudio, se decidió implementar en aceras, las cuales conforman parte del cañon urbano formado en una calle del área residencial seleccionada.

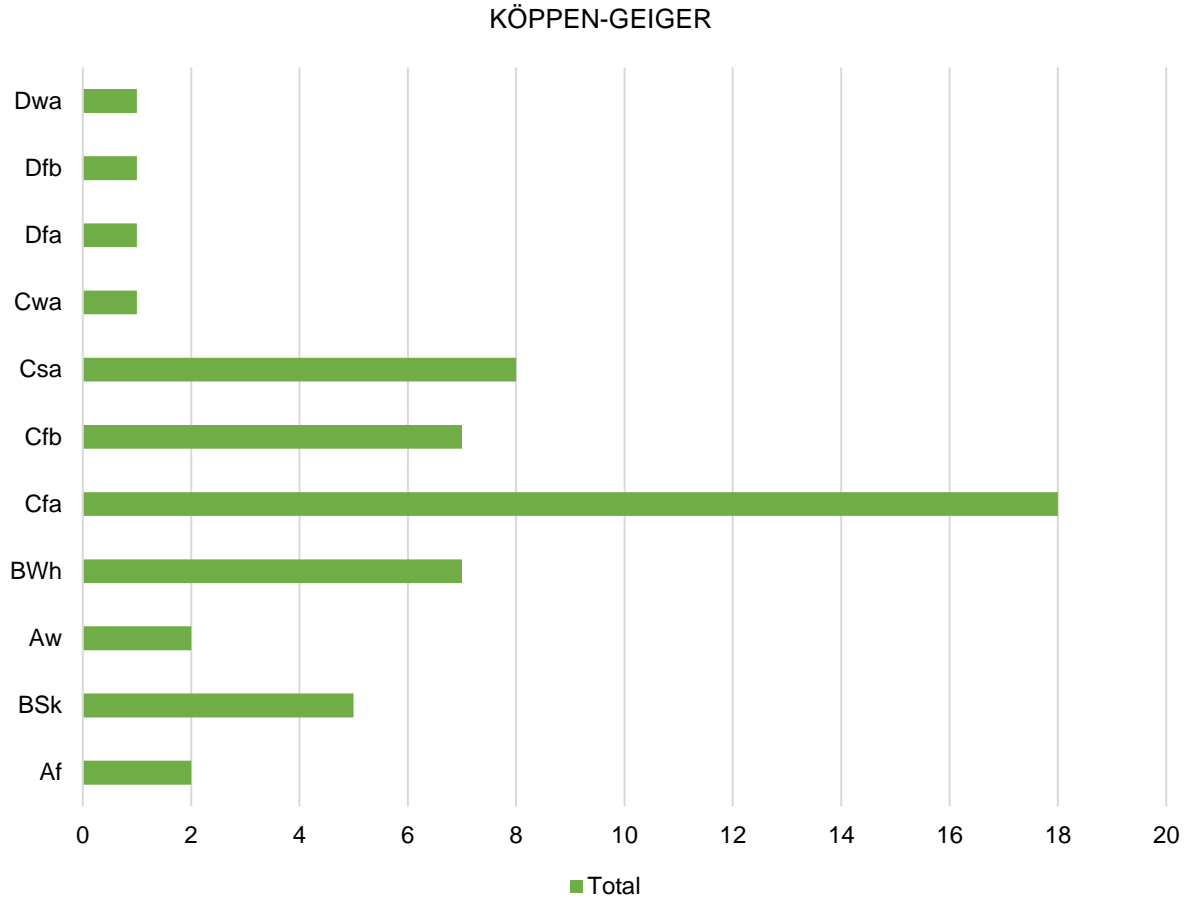
Figura 10. Área de estudio donde fue implementada la vegetación como estrategia para mejorar el confort térmico en la revisión de artículos del Estado del Arte.



Los parámetros climáticos afectan al confort térmico, por lo que se realizó un análisis, de la clasificación Köppen-Geiger a la que pertenecen los artículos estudiados. El mapa climático de Köppen-Geiger se basa en un conjunto de datos de estaciones de precipitación y temperatura mensuales a largo plazo, utilizando un modelo bidimensional método de interpolación spline de placa delgada. El mapa se divide en cinco tipos de clima de primer nivel, como tropical (tipo A), árido (tipo B), templado (tipo C), frío (tipo D) y polar (tipo E) (Li et al., 2018). Esta clasificación asocia la vegetación con el clima. Esto se refleja bien en la terminología climática; como el clima de selva tropical, el clima de estepa y otros. Cabe mencionar, que está reconocido por las normas ASHRAE 55 y EN15251 (Djamila & Yong, 2016).

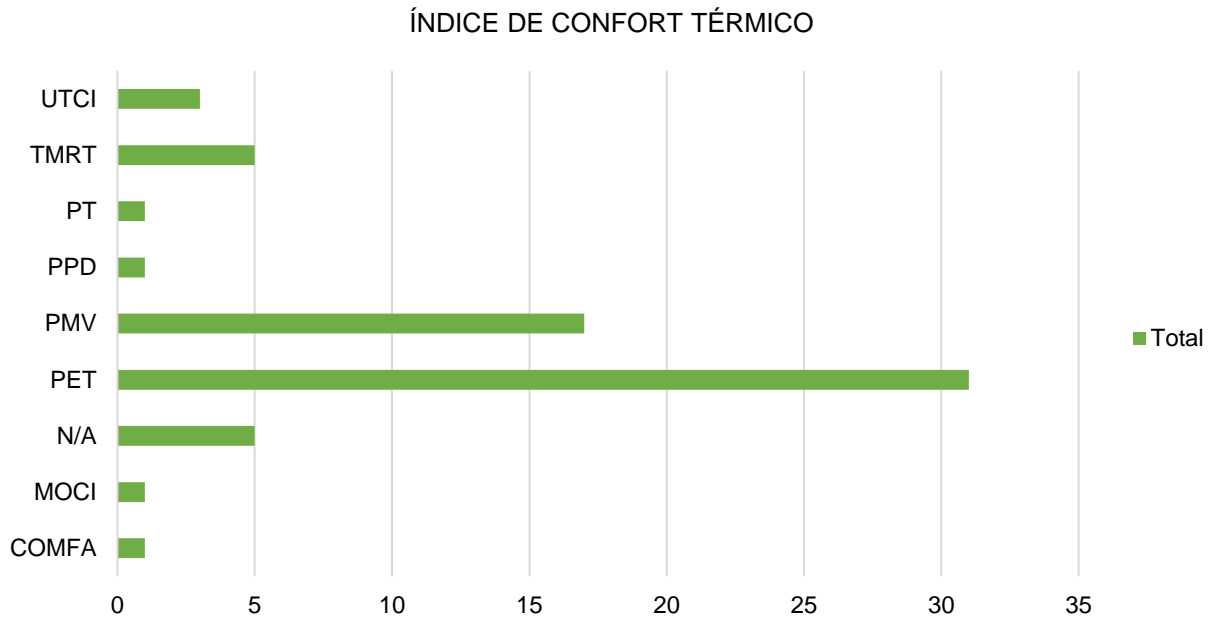
Como se muestra en la Figura 11, se han realizado más estudios en el clima Cfa (verano caluroso de la zona templada; sin estación seca), representando el clima más críticos. En los últimos puestos se encuentran las clasificaciones Dfa, Cwa, Csa, Bsh y Bsk, en los cuales se ha visto un número creciente de publicaciones.

Figura 11. Clasificación Köppen-Geiger de los lugares donde fueron implementados los estudios.



Conocer la percepción térmica y el grado de estrés fisiológico de un vecindario urbano es más significativo para los residentes urbanos que simplemente reconocer las áreas de calor extremo a partir de la temperatura de la superficie urbana (Zhao et al., 2018). Se han desarrollado varios índices biometeorológicos para describir el nivel de confort térmico humano vinculando la condición microclimática local y la sensación térmica humana (Chen & Ng, 2012). En la presente clasificación, se estudia el impacto de la configuración de la vegetación en el confort térmico exterior utilizando los métodos de simulación numérica. El cálculo de tales índices de los artículos, fue realizada en el software ENVI-met. Como se muestra en la Figura 12, los más utilizados son el Physiologically Equivalent Temperature (PET) y el Predicted Mean Vote (PMV).

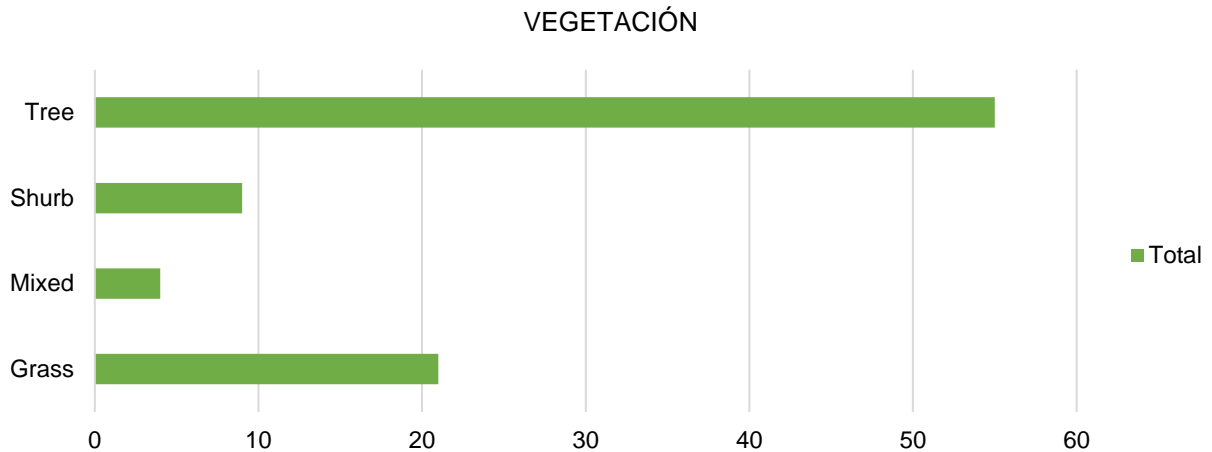
Figura 12. Índice de confort térmico utilizado en los artículos



El efecto de enfriamiento de la vegetación proviene principalmente de tres efectos: evapotranspiración, ventilación y sombra; y ENVI-met permite la simulación de todos estos procesos (Soudoudi et al., 2018). Como se muestra en la Figura 13, la vegetación que se utiliza son árboles, arbustos, pastos o combinaciones entre ellos, sin embargo, la utilización de árboles de sombra ha tomado protagonismo en los artículos, principalmente en el cañón urbano y aceras. Es importante explorar cómo la ubicación y la disposición de los árboles influyen en los microclimas exteriores y el confort térmico humano.

En segundo lugar se posiciona el zacate ó cesped, los cuales son utilizados en mayor parte en techos verdes o muros verdes. Por último, los arbustos y combinaciones son utilizados principalmente el el cañón urbano y techos verdes.

Figura 13. Tipo de vegetación implementada en los estudios



En esta revisión se pudieron identificar las tendencias en los últimos años sobre la utilización de vegetación en diferentes presentaciones para mitigar el efecto de la UHI y mejorar el confort térmico exterior en áreas residenciales, principalmente comprobando las diferentes teorías a través de la simulación en software. A partir de la información extraída del presente análisis del estado del arte, fueron seleccionadas las consideraciones teóricas en la cuales se basa la investigación. Por ejemplo, el índice PET para analizar el confort térmico y la utilización de árboles de sombreado, como estrategia de enfriamiento en espacios exteriores. Resaltando el uso de la herramienta de simulación ENVI-met para la obtención de resultados a través de la introducción de datos microclimáticos y para evaluar el confort térmico de los peatones

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Origen de la Isla de Calor Urbana (UHI)

La combinación entre falta de áreas verdes y la cantidad de materiales absorbentes de calor (como el pavimento) utilizados en los centros de población, dan lugar a la formación de la UHI, que trae consigo un aumento de temperatura e intensifica la concentración de contaminantes (Santamouris et al., 2018). En otras palabras, cuando una gran cantidad de tierra natural es reemplazada por una superficie construida artificial que absorbe la radiación solar entrante o el calor y lo vuelve a irradiar por la noche, se desarrolla el fenómeno (Nuruzzaman, 2015). El primer descubrimiento de UHI fue por Luke Howard en 1820, cuando reconoció la existencia de una diferencia térmica entre las noches y los días en Londres, ya que las noches eran 3,7 °F más cálidas y los días 0,34 °F más fresco en la ciudad en comparación con los alrededores (Priyadarsini, 2009). Wanphen & Nagano en su informe encontraron que la diferencia de temperatura podría ser tan alta como 5-15 °C entre las zonas urbanas y sus alrededores (rurales) (Andoni et al., 2018). Numerosos factores son responsables de este efecto como se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2. Ocurrencia de UHI en el contexto urbano por varias causas

Causas
1. Emisiones antropogénicas de calor
2. Contaminación y consumo de energía dentro de una ciudad
3. Evaporación reducida
4. Uso intensivo del suelo y alta densidad en áreas urbanas combinado con edificios con altas masas térmicas y propiedades de retención de calor.
5. Efectos de los cañones urbanos en las calles que resultan en tasas más bajas de pérdida de radiación de onda larga durante la noche
6. Reducción de la velocidad del viento causada por el diseño y la disposición del entorno construido
7. Atrapar la radiación de onda larga
8. Falta de áreas verdes y presencia de materiales con permeabilidad reducida
9. Presencia de materiales de bajo albedo en fachadas externas de edificios y superficies de carreteras

Nota. Adaptado de "Urban heat island mitigation strategies: A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong" por Aflaki et al., (2016), Cities, 62 (131–145).

VARIABLES como la ubicación del sitio, el espacio entre los edificios, materiales utilizados, la orientación y alturas de los edificios, alteran el acceso solar, la velocidad y dirección del viento a nivel peatonal. Por lo que, a menudo las condiciones térmicas empeoran como consecuencia del diseño urbano deficiente, incluida la falta de

sombra y la falta de ventilación (Yahia et al., 2018). Por lo tanto, las condiciones en diferentes puntos dentro de la capa de dosel urbano pueden diferir significativamente incluso en el mismo contexto climático general, y pueden verse afectadas por una variedad de factores relacionados con la geometría y las propiedades de la superficie (Shashua-Bar et al., 2009).

2.2.1.1. 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).

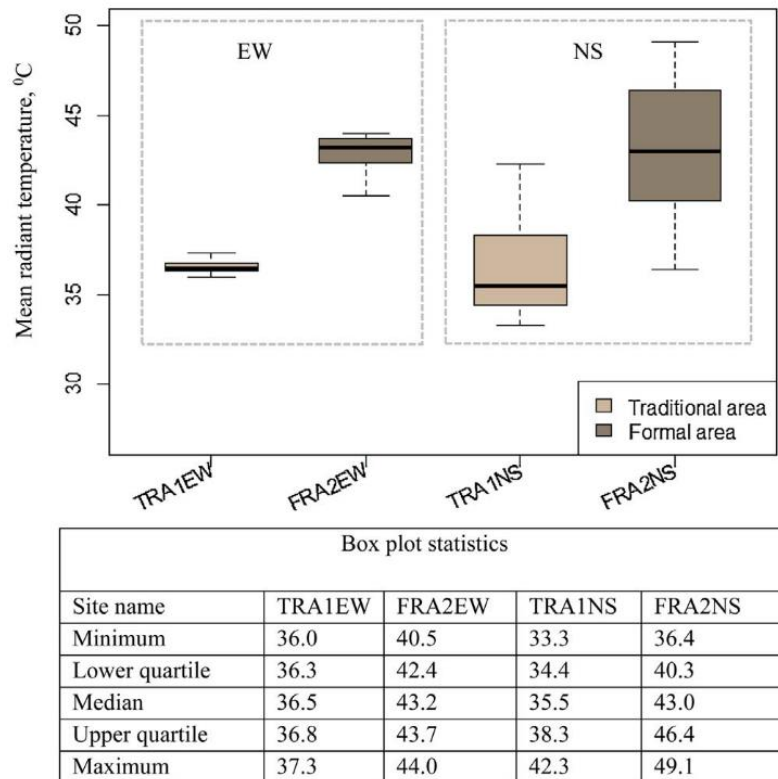
La geometría urbana es un factor de los patrones de diseño, que puede afectar de manera negativa las condiciones microclimáticas. Esta conformada por:

a) Orientación de la calle: es un parámetro importante ya 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).

Se ha demostrado que la geometría de los cañones urbanos juega un papel clave para determinar el efecto isla de calor y afectar el confort térmico en las calles. Sharmin et al., (2017) analiza en un estudio seis cañones urbanos en cuatro diferentes áreas residenciales en Dhaka, con diferentes características de geometría urbana. Se pueden clasificar en dos tipos: tradicionales y formales. Las tradicionales se caracterizan por un entorno de construcción compacto, alta densidad, alta relación de aspecto, patrón de calles sinuosas y altura de construcción variable. Por otro lado, las formales también tienen una forma construida compacta y un asentamiento de alta densidad; pero una relación de aspecto más baja con calles dispuestas en un patrón de rejilla y lo más importante, una altura uniforme del edificio. Los resultados del monitoreo microclimático mostró una diferencia de temperatura del aire promedio de 3.3 °C (mediana) y 6.2 °C máxima entre las áreas formales y tradicionales. En términos de T_{mrt} , las diferencias promedio (mediana) y máxima fueron de 2,3 °C y 10,0 °C respectivamente (Figura 14).

Figura 14. Comparación de la temperatura radiante media en áreas de estudio de caso simuladas entre las 12:00 y las 15:00



Nota. Obtenido de "Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment" por Sharmin et al., (2017), Sustainable Cities and Society, 34 (293–308).

Ali-Toudert & Mayer (2006) encontraron que aunque la duración de la incomodidad de las orientaciones intermedias era mayor que la de una calle N-S, las calles de orientación intermedia siempre estaban parcialmente sombreadas, ofreciendo así una alternativa a los peatones. Si se considerara un escenario invernal, las orientaciones NE-SW y NW-SE podrían proporcionar un buen compromiso porque ofrecen un mayor grado de exposición al sol que la orientación N-S.

2.2.1.2. Ecologización 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 CO₂. 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), menciona 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) establece 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 en toda su vida.

2.2.1.3. Materiales Urbanos

Las características técnicas de los materiales de construcción son determinante en el consumo energético, las condiciones de confort de los edificios y en la temperatura del espacio construido (Tumini, 2012). El fenómeno de UHI está

relacionado principalmente con el uso de materiales altamente absorbentes de calor, ya que absorben la radiación solar e infrarroja y disipan parte del calor acumulado a través de procesos convectivos y radiativos a la atmósfera aumentando temperatura ambiente (Santamouris et al., 2011). Taha en su investigación encontró que el aumento del albedo y la vegetación, tiene 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).

Cada material de construcción tiene una característica térmica única (Tabla 3). Los materiales de construcción tipo bloque, como el ladrillo y el hormigón, tienen una gran densidad (ρ) y un calor específico menor (c) en comparación con el hormigón celular y otros materiales como la madera (Wonorahardjo et al., 2020).

Tabla 3. Propiedades térmicas de los materiales de construcción comunes

Material	Densidad ρ (kg/m³)	Calor específico c [kJ/(kg K)]	Conductividad térmica κ [W/(m K)]
Ladrillo	1600–1800	0.879–0.974	~0.60–0.73
Concreto / cemento yeso	2000	0.880	0.61
GRC	2000–2400	~0.880	0.8–2.8
Yeso	~700–800	0.7–1.00	0.25–0.31
Concreto aireado	~500–850	~1.0–1.256	0.13–0.18
Madera	~300–700	1.3–2.4	~0.10–0.17
Multiplex	400–630	~2.1	0.11–0.19
Lana de vidrio	30–34	~0.84	0.03–0.06

Nota. Traducción de "Characterising thermal behaviour of buildings and its effect on urban heat island in tropical areas" por Wonorahardjo et al., (2020), International Journal of Energy and Environmental Engineering, 11 (129–142).

2.2.1.4. Consumo energético

El consumo global de energía ha aumentado constantemente debido al aumento de la temperatura. La revisión de los estudios mostró que la carga máxima de electricidad de un edificio aumenta hasta un 4,6 % para un grado de aumento de temperatura (Li et al., 2018). Situación alarmante, ya que casi toda la producción de energía y suposiciones implica alguna forma de contaminación (Almusaed, 2011). Está claro que las áreas urbanas con malas condiciones climáticas y de la calidad del aire necesitan más de los sistemas de climatización y de consecuencia de energía

eléctrica (Tumini, 2012). Por ejemplo, la UHI impone a los residentes de Los Ángeles que paguen aproximadamente 100 millones de dólares anuales por energía (Aflaki et al., 2016).

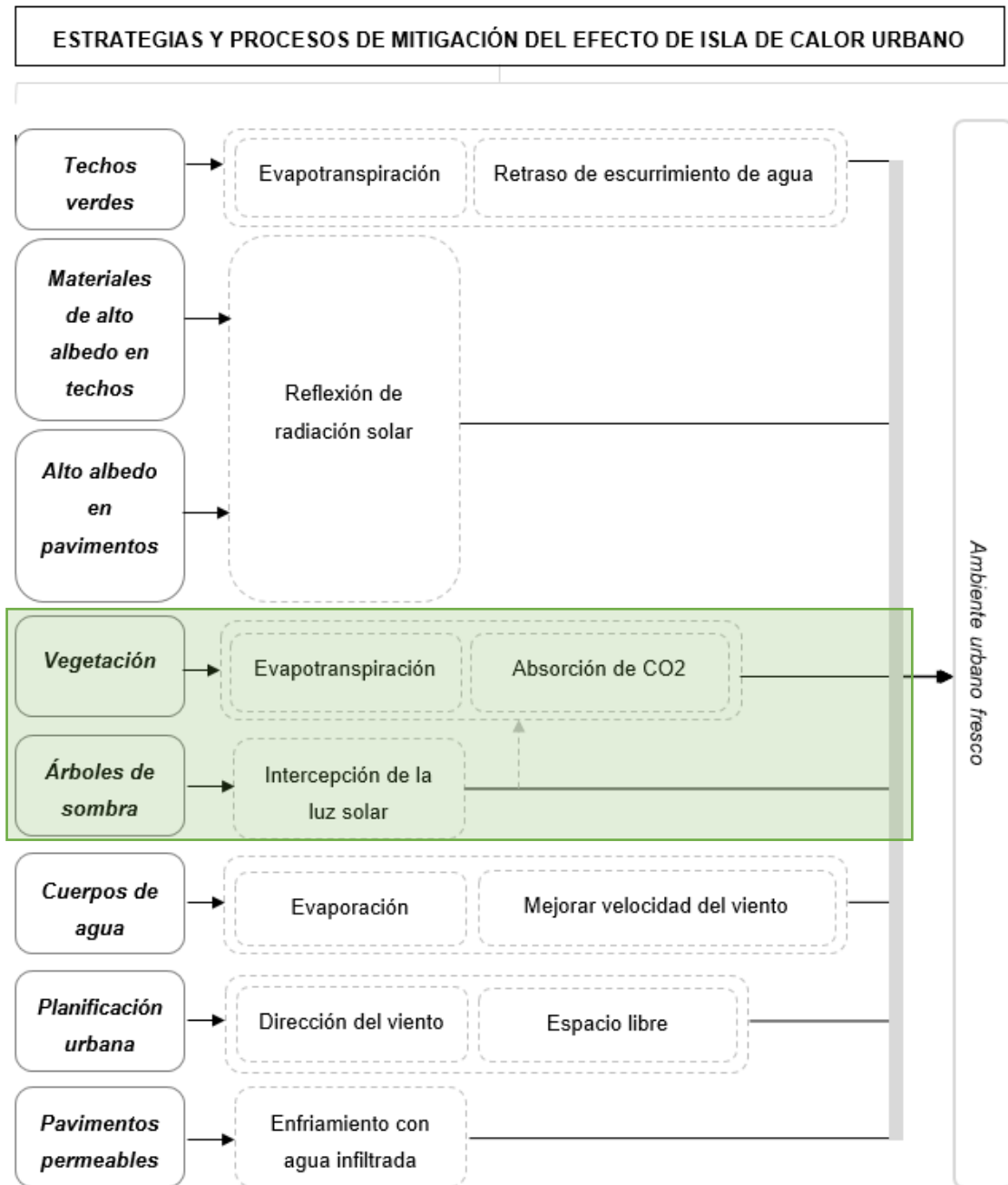
Aboelata & Sodoudi (2020), describen el efecto de la vegetación urbana en la reducción de la demanda energética de los edificios. Tan solo, el aumento de la reflectancia de la superficie por el árbolado urbano reduce el consumo de energía en un 3-5 %. Santamouris et al., (2018), menciona que numerosos estudios han demostrado que, en promedio, el potencial de enfriamiento de la vegetación urbana oscila entre 0 y 3,5 °C. Esta reducción de la temperatura ambiente del aire debido a la implementación a gran escala de vegetación en el entorno urbano da como resultado una menor demanda de energía de refrigeración para los edificios.

2.2.2. Estrategias de mitigación de la UHI

El efecto directo del UHI es un menor confort térmico de las personas en los espacios urbanos, donde no hay acceso a los sistemas de aire acondicionado (Taleghani, 2018). Para ayudar a los habitantes de las ciudades a adaptarse mejor a los posibles efectos del calentamiento global y las UHI en el entorno térmico urbano, y para mejorar el confort térmico en los espacios abiertos urbanos, se han propuesto y evaluado numerosas estrategias de diseño (Lai et al., 2019).

Es de gran importancia explorar adecuadamente la esencia de la UHI con puntos de vista sobre sus causas e impactos y estudiar las estrategias de mitigación de la UHI de manera sostenible (Aflaki et al., 2016). A continuación se presentan en la Figura 15, las principales medidas para enfriar el entorno urbano, mencionadas por Nuruzzaman, en su revisión sistemática *Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review*, que son: los techos verdes, materiales de alto albedo en techos y en pavimentos, vegetación, árboles de sombra, cuerpos de agua, planificación urbana y pavimentos permeables (Nuruzzaman, 2015).

Figura 15. Estrategias y procesos de mitigación del efecto de isla de calor urbano



Nota. Adaptado de "Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review" por Nuruzzaman (2015), International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, 3 (67).

Priyadarsini (2009) declaró que el aumento de la cobertura vegetal en una ciudad da como resultado un mayor nivel de enfriamiento por evaporación. Esto podría conducir a aplicaciones exitosas de otras técnicas de enfriamiento pasivo. Según

Taleghani (2018), la vegetación es un elemento de diseño importante en mejorar el microclima urbano y el confort térmico exterior en espacios urbanos.

2.2.3. Enfriamiento por medio de vegetación

El análisis de la vegetación podría ayudar a mitigar los efectos de las UHI y reducir el consumo de energía de refrigeración en verano (Andoni et al., 2018). El papel de la vegetación en el ajuste microclimático del paisaje urbano se ha investigado a diferentes escalas, desde estudios de espacios verdes urbanos a gran escala hasta micro estudios de vegetación (Zhang et al., 2020). Sin duda la primera y más efectiva medida para reducir la UHI es el uso de espacios verdes y árboles. La sustitución del manto vegetal por superficies artificiales tiene efectos directos e indirectos sobre el clima urbano, los directos son la creación de sombra y la acción sobre el viento, mientras que la evapotranspiración se considera como efecto indirecto (Tumini, 2012). Mediante este último proceso, se combina la transpiración del agua extraída por las raíces del suelo, que termina en los estomas de las hojas y la evaporación del agua en la superficie de las plantas. Esto genera el aumento de la liberación de calor latente en el entorno circundante, lo que lleva al enfriamiento del ambiente (Tsoka et al., 2018).

La vegetación se ha utilizado de diversas formas en las ciudades. Desde una escala grande a local, podemos ver la vegetación en las ciudades como parques, árboles en las calles, jardines de césped y techos verdes (Taleghani, 2018). Usualmente son utilizados arbustos, diferentes tipos de cesped y ha tomado protagonismo el uso de árboles de sombreado.

2.2.4. Árboles de sombra

Los árboles reducen efectivamente la radiación térmica en espacios abiertos urbanos. Por reflexión y absorción, pueden eliminar una gran cantidad de radiación solar entrante de onda corta. Según Brown y Gillespie (1995), en general, solo el 10 % de la radiación visible y el 30 % de la radiación infrarroja se transmite a través de los árboles (Lai et al., 2019). Sin embargo, debido a que algunos árboles (y otras infraestructuras verdes por extensión) no funcionan bien en la mitigación del calor

urbano, existe una campaña en curso para el “árbol correcto en el lugar correcto” (Santamouris et al., 2018). El potencial de enfriamiento de los árboles varía según sus características (Tabla 4), 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 (Teshnehdel et al., 2020).

Tabla 4. Características de la vegetación utilizada en la literatura

Especie	Tipo de hoja	LAD	LAI (m ² /m ²)	Altura (m)	Altura del tronco (m)	Altura de la Corona (m)	Ancho de la corona (m)
Bombax malabaricum	Caducifolia	n/a	1,83	6	3	3	7
Ulmus Americana	Caducifolia	n/a	4,60 (S) 1,50 (W)	8	n/a	n/a	n/a
Metasequoia glyptostroboides	Caducifolia	n/a	2,45 (S) 0,18 (W)	12	n/a	n/a	5
Koelreuteria paniculata	Caducifolia	n/a	2,68 (S) 0,20 (W)	8	n/a	n/a	7
Magnolia denudata	Caducifolia	n/a	2,80 (S) 0,13 (W)	8	n/a	n/a	5
Prunus x yedoensis	Caducifolia	n/a	1,08 (S) 0,27 (W)	4	n/a	n/a	5
Zelkova serrata	Caducifolia	3,00	n/a	7	n/a	n/a	n/a
Ginkgo biloba	Caducifolia	1,25	n/a	8	n/a	n/a	n/a
Aesculus pavia	Caducifolia	1,85	n/a	10	n/a	n/a	n/a
Acer palmatum	Caducifolia	2,56	n/a	6	n/a	n/a	n/a
Castanea sativa	Caducifolia	2,23	n/a	9	n/a	n/a	n/a
Quercus acutissima	Caducifolia	2,20	n/a	9	n/a	n/a	n/a
Magnolia obovata	Caducifolia	1,10	n/a	4	n/a	n/a	n/a
Tillia amurensis	Caducifolia	2,60	n/a	8,5	n/a	n/a	n/a
Prunus yedoensis	Caducifolia	3,02	n/a	8	n/a	n/a	n/a
Robinia pseudoacacia	Caducifolia	2,70	n/a	9,5	n/a	n/a	n/a
Acer campestre	Caducifolia	n/a	n/a	12	n/a	n/a	9
Privet	Caducifolia	n/a	n/a	5	n/a	n/a	5
Fraxinus velutina	Caducifolia	n/a	n/a	6	n/a	n/a	5
Washingtonia filifer	Perenne	n/a	n/a	10	n/a	n/a	9
Acacia salicina	Perenne	n/a	n/a	6	n/a	n/a	9
Aleurites moluccana	Perenne	n/a	3,10	9	3	7	7
Melaleuca quinquenervia	Perenne	n/a	2,20	11	2		3
Melaleuca leucadendron	Perenne	n/a	3,42	11	3	8	6
Roystonea regia	Perenne	n/a	1,10	13	9	4	6
Casuarina equisetifolia	Perenne	n/a	1,52	14	4	10	7
Livistona chinensis	Perenne	n/a	2,11	11	6	5	6
Macaranga tanarius	Perenne	n/a	3,02	4	1	3	8
Bauhinia blakeana	Perenne	n/a	3,55	7	2	5	6

Nota. Elaborado a partir de Li et al., (2019), Morakinyo et al., (2017), Morakinyo et al., (2018), Zhang et al., (2018), Zhao et al., (2018), Yuan et al., (2017), Yahia & Johansson (2014).

Se encontró que las áreas con dosel tenían temperaturas más bajas y el grado de disminución de temperatura se relacionó con la densidad del dosel. Las temperaturas bajo el dosel fueron 1,5 °C (temperatura del aire), 1,336 ° C (temperatura de la superficie terrestre) y 0,6 °C más bajas (PET) (Zhang et al., 2020). El sombreado afecta la comodidad humana, ya que alterará la temperatura percibida, que depende del flujo de radiación entre las personas y el entorno local que de la convección. Por lo tanto, el calor que se percibe depende de la temperatura del entorno y del grado de insolación y no de la temperatura del aire (Armson et al., 2012).

En una investigación desarrollada por Speak et al., (2020) clasificaron los datos de los árboles en orden taxonómico, la forma de la copa del árbol, la forma de la hoja, la clase de área foliar y si las hojas estaban dispuestas compuestas o simples. Respecto a los datos meteorológicos, se obtuvo información de radiación solar, velocidad del viento, temperatura y humedad a cada 10 min de la estación meteorológica municipal, ubicada dentro de la ciudad de Bolzano, Italia y a 2 km del sitio de muestreo más lejano (Tabla 5).

Tabla 5. Características y códigos de árboles.

Measurement	Units	Code	Technique
Cooling	°C	ΔT	Mean surface temperature reference image minus mean surface temperature shaded image
Cooling, adjusted	°C	ΔT_{adj}	ΔT adjusted for day and time of day
Leaf Area Index (cept)	$m^{-2} m^{-2}$	LAIcept	Ceptometer
Tree height	m	H	Hypsometer
Crown height	m	C_H	Hypsometer
Crown diameter	m	D	Tape measure
Diameter at Breast Height	cm	DBH	Tape measure
% Canopy missing	%	MISS	Visual appraisal (i-Trees)
% Condition	%	COND	
Leaf colour lightness	-	LIG	Minolta CR400 Chroma Meter
Gap fraction vertical	%	GAP1	Image analysis of vertically taken hemispherical photos
Gap fraction horizontal	%	GAP2	Image analysis of horizontally taken photos using UrbanCrowns software
UrbanCrowns height	m	UC_H	
UrbanCrowns diameter	m	UC_D	
UrbanCrowns Volume	m^3	UC_VOL	
Log volume	m^3	LOGVOL	Natural logarithm taken of volume
Air temperature	°C	AIRT	Weather Station data
Relative Humidity	%	HUM	
Wind Speed	$m s^{-1}$	WIND	
Radiation	$W m^{-2}$	RAD	
Albedo	-	ALB	Photographic estimation
Grass cover	%	GRASS	
Categorisations			
Tree crown shape	-	Cshape	Visual appraisal of horizontal images
Leaf shape	-	Lshape	Literature / visual appraisal of images
Leaf area	cm^2	Larea	Small (0 - 12), Medium (12 - 44), Large (44 +), Needle
Leaf arrangement	-	Larrange	Compound or Simple leaf arrangement
DH ratio	-	DHratio	UC_D / UC_H (Crown Diameter/Crown Height)
Cooling index	$^{\circ}C m^{-1}$	COOLrate	$\Delta T_{adj}/D$
Tree height factor	-	H_fact	Jenks natural breaks data clustering method
Crown width factor	-	D_fact	

Nota. Obtenido de "The influence of tree traits on urban ground surface shade cooling" por Speak et al., (2020), Landscape and Urban Planning, 197 (103748).

Varios investigadores han estudiado la disposición óptima de la vegetación, al reorganizar las ubicaciones de los árboles en un estacionamiento de la calle, Lai et al., (2019) describe en su estudio que Milosevic et al., (2017) lograron una mejora en el confort térmico exterior en el 77 % de las ubicaciones. Tan et al. (2015) indican que las copas de los árboles pueden mantener la superficie más fría que el aire de arriba. La temperatura del aire se enfría 1 °C a nivel peatonal (1,50 m) por la mañana y 1,5 °C por la tarde (Andoni et al., 2018).

Zhang et al., (2018), en un estudio exploró las características de un componente del árbol (copa) que representa una gran parte del efecto de enfriamiento. Se realizó una medición de campo en Gold Coast, Australia, que tiene un clima subtropical (Cfa), según la clasificación climática de Köppen. Específicamente, este estudio descompuso las características de las copas de un árbol en cuatro indicadores, índice de dosel bruto (GCI), índice de capa de hojas (LLI), índice de volumen de copa (CVI) e índice de dosel total (TCI); y concluye en que los árboles con copas más anchas y mayor cantidad de hojas, representadas por una copa más grande y / o más densa, crean ambientes térmicos óptimos en verano.

2.2.5. Características de los árboles de sombreado

2.2.5.1. Índice del Área Foliar (LAI)

Como lo describe Hirose (2005), Masami Monsi y Toshiro Saeki publicaron un artículo sobre el factor luz en las comunidades vegetales y su importancia para la producción de materia en los japoneses en 1953. Este artículo es conocido como el primero que presentó un modelo matemático de la fotosíntesis del dosel. Cuantificaron la atenuación de la luz a través de el dosel y la fotosíntesis modelada del dosel como una integración de la fotosíntesis de hojas expuestas a diferentes luces bajo cierto clima.

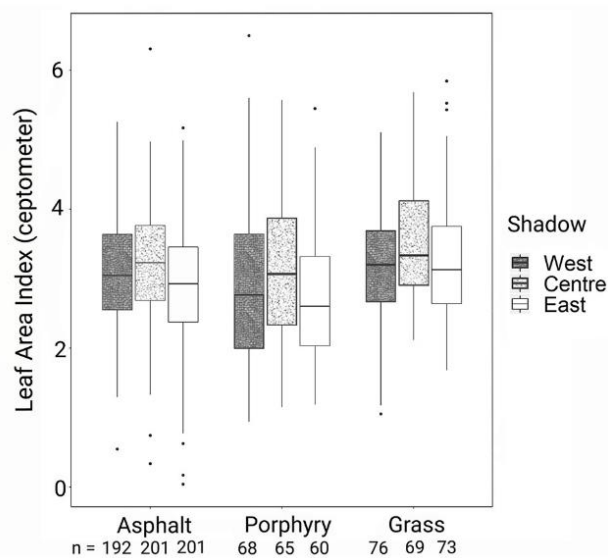
El índice del Área Foliar tiene su planteamiento por Watson (1947) y se ha utilizado para agregar características a nivel de hojas en el dosel de la vegetación. El LAI, es definido como la mitad del área foliar verde total por unidad de superficie horizontal del suelo, es un parámetro biofísico clave en los procesos de la superficie terrestre y

los modelos del sistema terrestre (Xinlu 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), existen dos maneras para estimar el LAI: directa e indirecta. La forma directa, conocida también como destructiva, consiste en salir a campo y emplear algún método de colecta/cosecha de tejido foliar que será utilizado para la obtención del área foliar específica y su posterior multiplicación por el material foliar colectado en trampas de hojarasca. La indirecta, u 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).

Speak et al., (2020), en su investigación calcularon el LAI con un ceptómetro, dentro de cada árbol, la sombra y externamente se midió con un ceptómetro AccuPAR LP-80 justo por encima del nivel del suelo a la altura de los brazos para evitar la sombra del medidor.

Figura 16. Índice de área foliar (método del ceptómetro) en tres ubicaciones dentro de la sombra del árbol para cada tipo de superficie



Nota. Obtenido de "The influence of tree traits on urban ground surface shade cooling" por Speak et al., (2020), Landscape and Urban Planning, 197 (103748).

Yahia & Johansson (2014) mencionan en su investigación, que si se se conoce la densidad del área foliar (LAD) 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.

2.2.5.2. Densidad del Área Foliar (LAD)

La densidad del área foliar (LAD) es un parámetro importante que se utiliza para modelar la turbulencia y el intercambio de calor entre la vegetación y los alrededores. La LAD puede obtenerse a partir del índice de área foliar (LAI) (Zhang et al., 2018). Es un índice de la estructura del dosel de la vegetación del techo verde (Peng & Jim, 2013). La necesidad de una descripción a escala fina de la estructura de la vegetación está aumentando a medida que la densidad del área foliar (LAD, m² / m³) se convierte en un parámetro crítico para comprender el funcionamiento del ecosistema y los flujos de energía y masa en ecosistemas heterogéneos (Soma et al., 2021). En ENVI-met, el LAD es una variable importante relacionada con múltiples procesos, tales como intercepción solar, evapotranspiración, arrastre del viento y turbulencia atmosférica adicional debido a la vegetación (Wu et al., 2016).

Morakinyo et al., (2020), desarrollarán en su investigación un esquema de clasificación de árboles generalizado basado en cuatro parámetros físicos ó estructurales, es decir, la densidad del follaje, altura del árbol, altura del tronco y diámetro de la copa; y sus sub-formas determinadas principalmente por una base de datos reconocida de árboles del paisaje Las combinaciones de estos cuatro parámetros físicos y sus respectivas sub-formas producen una posible permutación de 54 formas de árboles, lo que implica una alta probabilidad de que cualquier árbol urbano del mundo se clasifique en uno de estos posibles (Tabla 6).

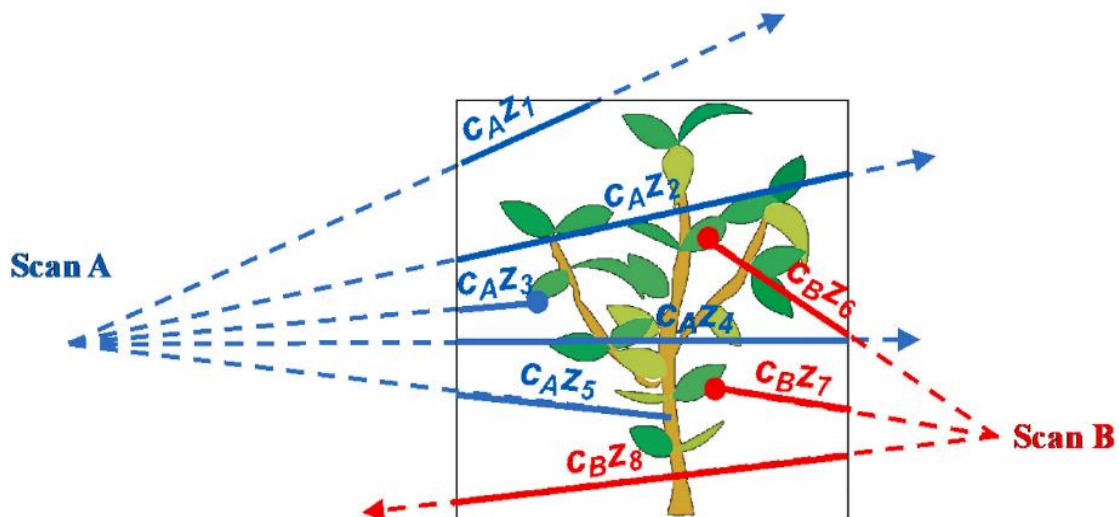
Tabla 6. Esquema de clasificación de las características físicas de los árboles

Parámetro	Sub-clase	Valor	Valor aplicado
Densidad del follaje	Denso	LAI > 3,0	3,5
	Moderado	LAI = 1,5-3,0	2,5
	Escaso	LAI = 0,5-1,5	1,5
Altura del árbol (m)	Alto	16-24	20
	Medio	8-16	12
	Corto	<8	6
Altura del tronco (m)	Alto	>3	4
	Bajo	≤3	2
Diámetro corona (m)	Estrecho	≤4	3
	Medio	4-8	6
	Amplia	>8 m	9

Nota. Traducción de "Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation" por Morakinyo et al., (2020), Science of the Total Environment, 719 (137461).

Soma et al., (2021), describen en su estudio, que se han utilizado tecnologías para medir LAD a diversas escalas. El LiDAR aerotransportado puede proporcionar estimaciones del perfil del dosel en cereales secundarios y en áreas extensas, lo cual es muy útil para el monitoreo de bosques, pero las estimaciones difícilmente pueden evaluarse con referencias terrestres. Mientras tanto, el escaneo láser terrestre se ha utilizado con éxito para la medición local, como el área foliar total de árboles individuales y los perfiles LAD a escala de parcela (Figura 17).

Figura 17. Método de escaneo láser terrestre para calcular el LAD

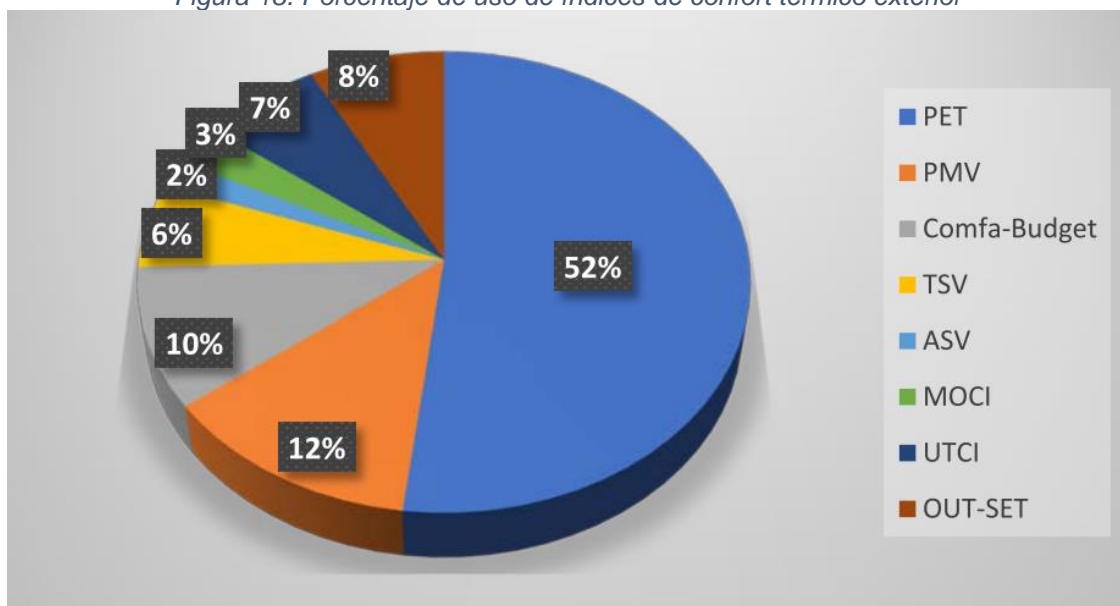


Nota. Adaptado de "Sensitivity of voxel-based estimations of leaf area density with terrestrial LiDAR to vegetation structure and sampling limitations: A simulation experiment" por Soma et al., (2021), Remote Sensing of Environment, 257 (112354).

2.2.6. Confort térmico en los espacios urbanos

Recientemente, tanto los climatólogos urbanos como los biometeorólogos/ bioclimatólogos han estudiado el fenómeno de las islas de calor urbano, la vegetación y los efectos del enfriamiento del parque, la mortalidad y la morbilidad relacionada con el estrés por calor y frío (Park et al., 2014). La UHI, el fenómeno que provoca el aumento de la temperatura en las zonas densas de las ciudades en comparación con las zonas rurales, también se está agravando. Así, el efecto combinado del cambio climático y la urbanización sobre el confort urbano y los problemas de salud es cada vez más preocupante, especialmente para los grupos débiles y desfavorecidos (ancianos y personas enfermas) (Teshnehdel et al., 2020). En general, hay más de 60 índices de estrés por calor que se han diseñado para evaluar los ambientes de temperatura. Estos incluyen principalmente el UTCI (índice de clima térmico universal), PET (temperatura fisiológicamente equivalente), PMV (voto medio previsto), entre otros (Wang et al., 2021), como muestra Nasrollahi et al., en la siguiente figura (*Figura 18*), en una revisión de 153 artículos sobre estrategias de mitigación del calor para mejorar el confort térmico de los peatones en entornos urbanos, se identificó que el PET fue el índice más utilizado (Nasrollahi et al., 2020):

Figura 18. Porcentaje de uso de índices de confort térmico exterior



Nota. Obtenido de "Heat-Mitigation Strategies to Improve Pedestrian Thermal Comfort in Urban Environments: A Review" por Nasrollahi et al., (2020), Sustainability, 12 (10000).

El confort térmico es un proceso intensivo en energía que representa hasta el 60-70 % del consumo total de energía en edificios no industriales (Manzano-Agugliaro et al., 2015). Recientemente se ha hablado de los sistemas que se emplean para las alertas y las recomendaciones para la salud y la seguridad de las personas y se han multiplicado las investigaciones que relacionan el uso del espacio público con las condiciones térmicas experimentadas por los usuarios (Tumini, 2012). La temperatura del aire no coincide habitualmente con la sensación térmica real que siente una persona, que depende también de otros factores como la velocidad del viento, la radiación, la humedad, entre otros. Por ello, para un análisis bioclimático, y concretamente de las sensaciones térmicas, hay que elegir entre los diversos índices térmicos existentes uno adecuado para dicho análisis (Royé et al., 2011).

2.2.7. Índices de evaluación del confort térmico

2.2.7.1. 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), se realiza a partir de los datos diarios de la temperatura máxima y mínima, de la humedad, del viento, de la insolación y de la nubosidad, obteniendo, así, una imagen precisa 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 7).

Tabla 7. 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).

Müller et al., (2014), realizaron un estudio en la ciudad de Oberhausen, Alemania, donde fueron simulados un caso base y distintos escenarios con vegetación, para posteriormente compararlos. En tal estudio se llegó a la conclusión, de que las áreas de vegetación logran mayores reducciones de PET que las superficies de agua debido a una combinación de evapotranspiración y sombra; las áreas de vegetación alcanzan su potencial máximo de reducción de PET solo con un suministro de agua adecuado. Pueden ocurrir diferencias en los niveles de confort térmico de las áreas de vegetación bien regadas y no regadas, especialmente durante el día.

Colter et al., (2019), en su estudio mostraron un resumen de los datos de Temperatura media radiante (T_{mrt}) y PET, bajo la sombra del dosel de seis taxones de árboles, ramadas, o a pleno sol dentro de siete parques residenciales durante junio y julio de 2015 entre las 12 h 00 y las 14 h 00 en Phoenix, Arizona. Los valores de PET a pleno sol fueron 15,0 ° C – 23,5 ° C y 6,9 ° C – 12,6 ° C más altas, respectivamente, que bajo la sombra del dosel de ramada o árboles.

Tabla 8. Temperatura Media Radiante y PET

Tipo de sombra	Tmrt (° C)	PET (° C)
Fraxinus	36,8	38,5
Parkinsonia	45,3	44,2
Pinus	36,9	39,9
Prosopis	44,5	42,6
Quercus	39,0	39,8
Ulmus	39,0	39,9
Ramada	40,4	40,3
Full Sun	60,3	51,1

Nota. Traducción de "Effects of natural and artificial shade on human thermal comfort in residential neighborhood parks of Phoenix, Arizona, USA" por Colter et al., (2019), Urban Forestry and Urban Greening, 44 (126429).

2.2.7.2. 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 establece una tensión térmica basada en la transferencia de calor en estado estacionario entre el cuerpo y el ambiente, y asigna un voto de confort a esa cantidad de tensión. Es calculado a través de seis variables: metabolismo, aislación de la ropa, temperatura del aire interior, temperatura radiante media interior, velocidad y humedad del aire 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 19), correspondiendo cada valor a una categoría (Chávez et al., 2002).

El rendimiento deficiente del PMV en la estimación de la sensación térmica en ambientes cálidos siempre se ha considerado como uno de los principales inconvenientes de este modelo. Esta deficiencia bien conocida a menudo se atribuye a que la PMV pasa por alto la adaptación térmica (Omidvar et al., 2020).

Figura 19. 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.

Rui et al., (2018), describen en su estudio la formula para calcular el índice PMV (Ec. 2), donde donde M es la tasa metabólica (W / m²), W es el trabajo externo (W / m²), A_{Du} es el área de superficie de la piel humana (m²), E_d y E_{sw} son la pérdida de calor por difusión de humedad y evaporación del sudor (W), respectivamente. E_{re} y L son la pérdida de calor latente de la respiración y la pérdida de calor sensible de la respiración (W), respectivamente. R y C son intercambio de calor radiante e intercambio de calor convectivo (W), respectivamente. La t_a es la temperatura del aire (°C); t_r es la temperatura radiante media (°C). v_a es la velocidad del viento (m / s). rh es la humedad relativa (%). I_{cl} es el aislamiento de la ropa (clo).

$$PMV = \left[0.028 + 0.303 \cdot \exp\left(-0.036 \cdot \frac{M}{A_{Du}}\right) \right] \cdot \left(\frac{W}{A_{Du}} - E_d - E_{sw} - E_{re} - L - R - C \right) = PMV(t_a, t_r, v_a, rh, M, I_{cl})$$

Ec. 2.

2.2.7.3. Índice Universal del Clima Térmico (UTCI)

En 2011, la Sociedad Internacional de Biometeorología (ISB) anunció un nuevo índice para ambientes térmicos al aire libre llamado Índice de Clima Térmico Universal. Fue desarrollado bajo la ISB Comisión 6 por COST (Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología) Acción 730 bajo el programa de la WMO (Comisión de Climatología) (Park et al., 2014). El sistema del índice debe asegurar una correcta

representación del comportamiento del cuerpo humano de un sujeto no aclimatado, respecto un amplio abanico de condiciones climáticas, para los espacios exteriores, pueden ser muy diferentes: calor, frío, viento fuerte, humedades muy altas o muy bajas, radiación solar muy fuerte, entre otros (Tumini, 2012).

En un estudio reciente de Krüger et al. mostraron una limitación del UTCI, su investigación evidenció que se encontraron valores bajos de UTCI en las dos ubicaciones subtropicales para el umbral más bajo de la banda de confort térmico en comparación con el umbral original (Wang et al., 2021). Wu et al., (2016), describen en su estudio la escala de evaluación UTCI (Tabla 9) proporcionada por la Comisión de Fisiología Térmica de la Unión Internacional de Ciencias Fisiológicas.

Tabla 9. 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 Es necesario beber > 0,35 L / h de líquidos.
+32 a +38	Fuerte estrés por calor	Se recomienda permanecer en lugares sombreados. Periódicamente, se recomienda una reducción de la actividad física. 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
+38 a +46	Muy fuerte estrés por calor	El enfriamiento corporal temporal es necesario periódicamente. Es necesario beber > 0,5 L / h. Evite la actividad física
>46	Extremo estrés por calor	

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).

2.2.8. Parámetros climáticos que afectan al Confort Térmico

Los parámetros climáticos que afectan el confort térmico son el aire y la temperatura media de radiación, la humedad relativa y la velocidad del viento (Nasrollahi et al., 2020). Varios estudios han demostrado que la radiación juega un papel importante en el confort térmico (Taleghani, 2018).

2.2.9. Métodos de estudio de confort térmico exterior

2.2.9.1. Monitoreo (estudio en campo)

Lai. et al., realizaron una revisión sobre las las estrategias de mitigación para mejorar el entorno térmico y el confort térmico 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 (Lai et al., 2019).

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).

2.2.9.2. 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 resolver la transferencia de calor y masa 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).

2.2.10. ENVI-met Software

ENVI-met fue desarrollado por Michael Bruse en la Universidad Ruhr de Bochum. El primer lanzamiento oficial del modelo data de 1998. En marzo de 2018, se identificaron casi 280 artículos respectivos en la base de datos Scopus; El 68 % de ellos corresponden a artículos publicados en revistas científicas, mientras que el 31 % y el 1 % restante corresponden a ponencias de congresos y capítulos de libros, respectivamente (Tsoka et al., 2018). El modelo se ha aplicado en un gran número de estudios científicos que tratan de las islas de calor urbanas y las estrategias de mitigación del estrés por calor humano (Tsoka et al., 2017).

ENVI-met es un software de simulación microclimática basado en dinámica de fluidos computacional (CFD) (Arapakis, 2019), que es capaz de simular interacciones a microescala entre superficies urbanas, vegetación y atmósfera. ENVI-met permite el análisis de los efectos de cambios a pequeña escala en el diseño urbano (Ej., Árboles, áreas verdes en los patios traseros, nuevas constelaciones de edificios) sobre el microclima en diferentes condiciones de mesoescala (Bruse & Flear, 1998). Varios estudios han demostrado que ENVI-met es capaz de simular y evaluar el microclima en áreas urbanas simples y complejas (Ej. Abdi et al., 2020; Srivanit et al., 2020; Ouyang et al., 2020; Fahmy et al., 2020; Morakinyo et al., 2020; Ouali et al., 2020; Rahman et al., 2020; Yang et al., 2019; Chatterjee et al., 2019; Zhao et al., 2018).

Metodológicamente, ENVI-met es una herramienta adecuada para pronosticar los cambios microclimáticos de los entornos urbanos y evaluar el confort térmico de los peatones (Alchapar & Correa, n.d.). Sin embargo, requiere parámetros de entrada del modelo que apenas están disponibles y que pueden garantizar una simulación adecuada de los fenómenos reales (Tabla 10) (Salata et al., 2016). Estos parámetros para la simulación en ENVI-met varían dependiendo de los objetivos del estudio y la ubicación donde es implementado.

Tabla 10. Datos utilizados en ENVI-met

Parámetros de entrada	Modelo de cálculo	Resultados de salida
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).

De acuerdo a distintas investigaciones, en la Tabla 11 se muestran las diferentes ventajas y limitaciones del uso del programa ENVI-met como software de simulación.

Tabla 11. Resumen de ventajas y limitaciones del programa ENVI-met como herramienta potencial de simulación

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Simula la dinámica microclimática dentro de un ciclo diario. • Permite una representación detallada de materialidades • Inclusión de evapotranspiración y fotosíntesis en vegetación • Alta resolución espacial (hasta 0,5 m en sentido horizontal) • Alta resolución temporal (hasta 10 segundos) • Utiliza leyes de la dinámica y la termodinámica de fluidos 	<ul style="list-style-type: none"> • Base de datos con número acotado de especies de vegetación • Tiende a subestimar la temperatura del aire durante el día • Tiende a sobreestimar la temperatura del aire durante la noche • ENVI-met no tiene en cuenta la información interior del edificio ni el comportamiento de ocupación. • ENVI-met no puede simular precipitaciones ni temperaturas por debajo del punto de congelación

Nota. Elaborada a partir de Alchapar et al., (n.d.), Stocco et al., (2018), Arapakis, (2019).

2.2.10.1. Módulo de vegetación

Bruse (2004), creador del software ENVI-met, describe que la vegetación se trata como una columna unidimensional con altura z_p (de un pico de perfil) en la que se utiliza el perfil de densidad del área foliar (LAD) para describir la cantidad y distribución de hojas. El mismo concepto se utiliza dentro del sistema del suelo: la distribución de las raíces está representada por el perfil de densidad del área de la raíz (RAD) que se extiende desde la superficie hasta la profundidad de la raíz ($-z_r$). Este esquema es universal y se puede utilizar para plantas pequeñas como césped o cultivos, así como para árboles grandes, si z_p y $-z_r$ se ajustan en consecuencia.

a) Flujos turbulentos de calor y vapor

Las interacciones entre las hojas de la planta y el aire circundante se pueden expresar en términos de sensibilidad flujo de calor ($J_{f,h}$), flujo de evaporación de agua líquida en las hojas ($J_{f, \text{evap}}$) y flujo de transpiración controlado por los estomas de la hoja ($J_{f, \text{trans}}$):

$$\begin{aligned}
 J_{f,h} &= 1.1r_a^{-1}(T_f - T_a) \\
 J_{f,\text{evap}} &= r_a^{-1}\Delta q\delta_c f_w + r_a^{-1}(1 - \delta_c)\Delta q \\
 J_{f,\text{trans}} &= \delta_c(r_a + r_s)^{-1}(1 - f_w)\Delta q
 \end{aligned}$$

Ec. 3.

T_a y q_a son la temperatura y la humedad específica del aire alrededor de la hoja, Δq es el déficit de humedad de la hoja al aire con $\Delta q = q^*(T_f) - q_a$. T_f es la temperatura del follaje y q^* el valor de saturación de q en la superficie de la hoja. La resistencia aerodinámica r_a es una función de la geometría de la hoja y la velocidad del viento:

$$r_a = A\sqrt{\frac{D}{\max(W, 0.05)}}$$

Ec. 4.

donde W = velocidad del viento en la superficie de la hoja. El parámetro A es $87 \text{ seg}^{0.5}\text{m}^{-1}$ para coníferas y pasto y $200 \text{ seg}^{0.5}\text{m}^{-1}$ para árboles de hoja caduca. D es el diámetro típico de las hojas que va desde $0,02 \text{ m}$ para las coníferas hasta $0,5 \text{ m}$ o más para las plantas tropicales. La condición máxima asegura que no aparezcan valores inválidos en el caso de vientos muy bajos. El factor δ_c se establece en 1 si se puede producir evaporación y transpiración ($\Delta q \geq 0$); de lo contrario, δ_c es 0 y solo es posible la condensación. Suponiendo que solo las partes húmedas de la vegetación pueden evaporarse (17b) y, por otro lado, solo las partes secas transpirarán (17c), se necesita la fracción de hojas húmedas dentro de una caja de rejilla. La fracción húmeda se puede calcular como:

$$f_w = \left(\frac{W_{\text{dew}}}{W_{\text{dew,max}}} \right)^{2/3}$$

Ec. 5.

donde W_{dew} es la cantidad real de rocío en las superficies de las hojas y $W_{dew, max}$ es el valor máximo posible (0.2 kgm^{-2}).

b) Resistencia estomática

La resistencia estomática r_s de una planta vital se calcula con respecto a la entrada de radiación de onda corta real y máxima (R_{sw} y $R_{sw, max}$) y del contenido de agua del suelo disponible dentro de la zona de la raíz (η):

$$r_s = r_{s, \min} \left[\frac{R_{sw, \max}}{0.03R_{sw, \max} + R_{sw}} + \left(\frac{\eta_{wilt}}{\eta} \right)^2 \right]$$

Ec. 6.

La resistencia estomática mínima $r_{s, \min}$ depende del tipo de planta y va desde $200 \text{ s}0,5\text{m}^{-1}$ para gramíneas hasta $400 \text{ s}^{0.5}\text{m}^{-1}$ para hojas caducas.

c) Balance energético de la hoja

Si se descuida el almacenamiento interno de energía dentro de la hoja, la temperatura del follaje T_f se puede obtener del balance energético de la hoja en estado estacionario:

$$0 = R_{sw, \text{net}}(z) + R_{lw, \text{net}}(z) - c_p \rho J_{f, h} - \rho L (J_{f, \text{evap}} + J_{f, \text{tran}})$$

Ec. 7.

donde c_p es el calor específico del aire y ρ la densidad del aire, L es el calor latente de vaporización. $R_{sw, \text{net}}$ es la radiación de onda corta neta absorbida por la superficie de la hoja calculada como:

$$R_{sw, \text{net}}(z) = (F \cdot R_{sw, \text{dir}}(z) + R_{sw, \text{dif}}(z))(1 - a_f - tr_f)$$

Ec. 8.

Aquí, F es un parámetro adimensional que describe la orientación de las hojas hacia el sol ($= 0.5$ para hojas orientadas al azar), a_f es el albedo del follaje y tr_f es un

factor de transmisión (establecido en 0.3). El balance de radiación de onda larga para la Ec. 6, viene dado por:

$$Ec. 9. \quad R_{lw,net}(z, T_f) = \varepsilon_f R_{lw}^{\downarrow}(z) + R_{lw}^{\leftrightarrow}(z) + \varepsilon_f R_{lw}^{\uparrow}(z) - 2\varepsilon_f \sigma_B T_f^4 - (1 - \sigma_{svf}(z)) \sigma_B T_f^4$$

Los términos fuente / sumidero para el modelo atmosférico finalmente se pueden calcular usando (17 a-c) con T_f obtenido al resolver la Ec. 6:

$$Ec. 10. \quad \begin{aligned} Q_h(z) &= LAD(z) J_{f,h} \\ Q_q(z) &= LAD(z) (J_{f,evapo} + J_{f,trans}) \end{aligned}$$

donde LAD es la densidad del área foliar en altura z . Las ecuaciones asumen que solo un lado de la hoja participa en los procesos de intercambio turbulento de calor y vapor (el lado luv) y absorbe la radiación de onda corta, mientras que en los espectros de radiación de onda larga, ambos lados de la hoja participan en el intercambio radiativo. proceso.

d) Balance hídrico de la planta/ sistema del suelo

Para garantizar una simulación realista de los mecanismos de retroalimentación entre la transpiración del agua por la planta y el suministro de agua por el suelo, el agua transpirada por la planta debe tomarse del suelo a través de la absorción de agua por las raíces, lo que resulta en una pérdida del contenido de agua del suelo. Si el suelo no proporciona suficiente agua, la resistencia de los estomas aumentará y la tasa de transpiración disminuirá. La masa total de agua (m_{trans}) transpirada por la planta viene dada por la integral vertical sobre los flujos de transpiración en las diferentes capas de la planta:

$$Ec. 11. \quad m_{trans} = \rho \int_0^{z_p} LAD(z) J_{f,trans}(z) dz$$

El agua se toma de diferentes capas de suelo dentro de la zona de raíces de la planta dependiendo de la cantidad de raíces en la capa (valor RAD (z)) y la difusividad hidráulica de la capa de suelo ($D_{\eta} (z)$):

Ec. 12.

$$S_{\eta}(-z) = \frac{m_{\text{trans}}}{\rho_w} \left(\text{RAD}(-z) D_{\eta}(-z) \right) \left(\int_{-z_r}^0 \text{RAD}(-z) D_{\eta}(-z) dz \right)^{-1}$$

CAPÍTULO 3.

METODOLOGÍA

El proceso metodológico de esta investigación consta de cinco etapas, la revisión de la literatura, por medio de la cual fue posible justificar la toma de decisiones en el planteamiento de la investigación; la selección del área de estudio, a través de un análisis con imágenes del satélite LANDSAT, para precisar áreas residenciales con mayor temperatura superficial; la selección de la vegetación, para la elección de la especie de árbol de sombreado; el diseño del experimento, que permitió comprobar la hipótesis y alcanzar objetivos; y el plan de análisis de resultados, a través del índice PET y gráficos.



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. Caracterización del estudio

Para realizar la investigación, fue planificado un proceso metodológico de 5 etapas, que constaron de la revisión de la literatura, selección del área de estudio, selección de las especies de vegetación, diseño del experimento y el plan de análisis de resultados.

Figura 20. Resumen de la caracterización metodológica del estudio



Para lograr la ejecución de la investigación fue necesario establecer los pasos y herramientas como se muestra en la Tabla 12.

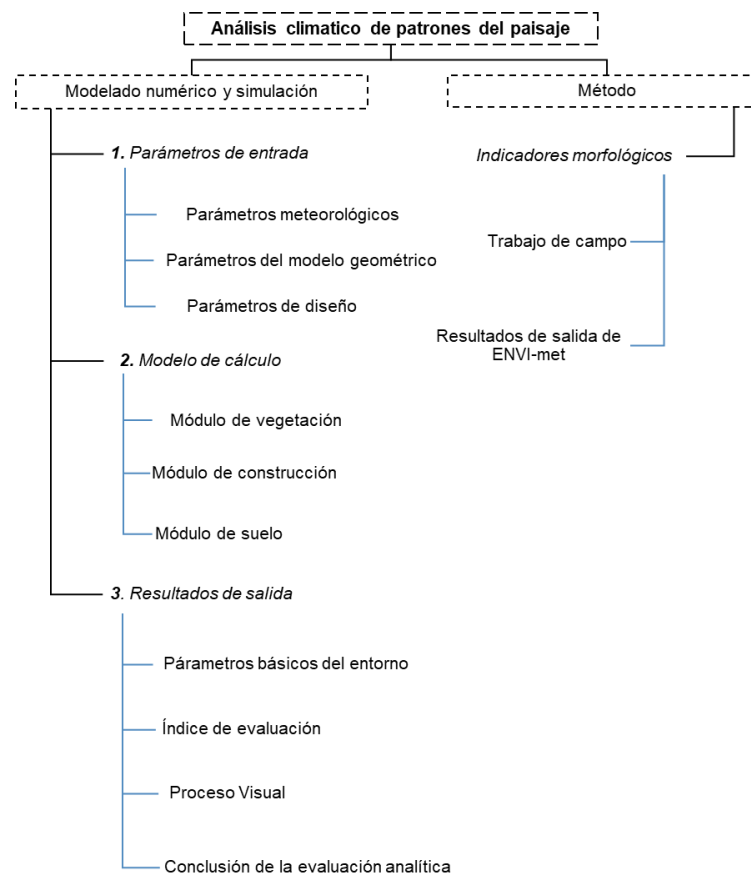
Tabla 12. Proceso metodológico de la investigación

Etapas	Pasos	Herramientas
1. <i>Revisión de la literatura</i>	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> a) Recursos bibliográficos digitales de información científica y tecnológica b) Gestionar referencias bibliográficas en "Aplicación Mendeley"
2. <i>Selección del área de estudio</i>	<ul style="list-style-type: none"> a) Revisión de informes sobre la UHI en Ensenada b) Determinar zonas críticas c) Marcar áreas residenciales dentro de la zona d) Selección de unidad de análisis. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Mapas satelitales
3. <i>Selección de la vegetación</i>	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> a) Casos análogos b) Tabla de análisis comparativo c) Entrevista con especialista
4. <i>Diseño del experimento</i>	<ul style="list-style-type: none"> a) Estudio de la unidad de análisis b) Definir objetivos del experimento c) Estudio de las variables consideradas en la temporada de verano d) Selección de equipo para obtención de datos e) Diseño de prototipo de escenarios f) Selección de método de análisis 	<ul style="list-style-type: none"> a) Casos análogos b) Tabla de análisis comparativo c) Archivo climático de Ensenada B.C. d) ENVI-met

5. *Plan de análisis de resultados*
- g) Simulación en software de los escenarios
 - a) Obtener un modelo estadístico-descriptivo
 - b) Comparación entre escenarios
 - c) Análisis de confort térmico
 - a) Software ENVI-met
 - b) Índice PET

Para obtener resultados, fue necesario introducir datos climáticos monitoreados del día seleccionado y la elaboración de modelos de cálculo en ENVI-met (Figura 21). Para el análisis del microclima y la influencia de los elementos del paisaje, además de realizar un modelo 3D, donde intervienen tres módulos, el de construcción, el de vegetación y el de suelo. Los datos de salida que ofrece el software son parámetros básicos del entorno, índices de evaluación y procesos visuales que permiten llegar a una conclusión de evaluación-analítica.

Figura 21. Diagrama de "Análisis de los patrones del paisaje" con desglose de variables.



3.1.1. Objeto de estudio

El objeto del presente estudio es el efecto de enfriamiento causado por distintas configuraciones de arreglo de un árbol de sombreado.

3.1.2. Variables

Como se muestra en la Tabla 13, la variable (dependiente) de estudio de la presente investigación es el confort térmico. Tales valores de confort térmico, dependen de la configuración de vegetación propuesta en los distintos escenarios de simulación (variable independiente), que se modelaron en el software ENVI-met.

Tabla 13. Variables de estudio

Dependientes	Independientes
1. Confort térmico	Escenarios de simulación: <ul style="list-style-type: none"> • Caso base • Con una especies de vegetación, los siguientes escenarios: <ul style="list-style-type: none"> a) Intervalos iguales entre árboles (6,70m) b) Intervalos iguales entre árboles (13,40m) c) Agrupación de dos árboles a cada 6,70m d) Agrupación de dos árboles a cada 13,40m

A continuación, en la Tabla 14 se presentan las constantes de estudio, que representan los valores utilizados como caso base ó la situación actual del área de estudio. Los parámetros utilizados son: las características de la especie de vegetación, es decir el emplazamiento, la altura, el ancho de la corona y el tipo de hoja; las condiciones microclimáticas del lugar, donde se abarca la Temperatura del Aire (Tair), la Temperatura Media Radiante (Tmrt) y la Humedad Relativa (H.R.); y por último la geometría urbana, donde se muestran características de los edificios y de las superficies.

Tabla 14. Constantes de estudio

Constantes de estudio	
Especie de vegetación	
1. Calidad del sombreado	<ul style="list-style-type: none"> • Emplazamiento (Tabla 13) • Altura (Tabla 15) • Ancho de la corona (Tabla 15) • Tipo de hoja (Tabla 15)

Microclima

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1. Condiciones meteorológicas | <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura del aire (Tabla) • Temperatura media radiante • Humedad Relativa (Tabla) |
|-------------------------------|--|

Geometría Urbana

- | | |
|--|--|
| 1. Edificios/ carreteras | <ul style="list-style-type: none"> • Orientación de la calle • Anchura de la calle • Longitud de rugosidad en el punto de referencia |
| 2. Superficie
(Albedo/Emisividad/Longitud de rugosidad) | <ul style="list-style-type: none"> • Cobertura de nubes • Suelo • Carretera de Asfalto • Pavimento de hormigón ligera • Pavimento de hormigón gris • Grava • Agua |
-

3.2. Área de estudio

Para la presente investigación, fue seleccionada como área de estudio la ciudad de Ensenada B.C., México, ubicada a 31° 52' de latitud norte y a 116° 37' de longitud oeste. Sus características climatológicas fueron analizadas en el siguiente apartado.

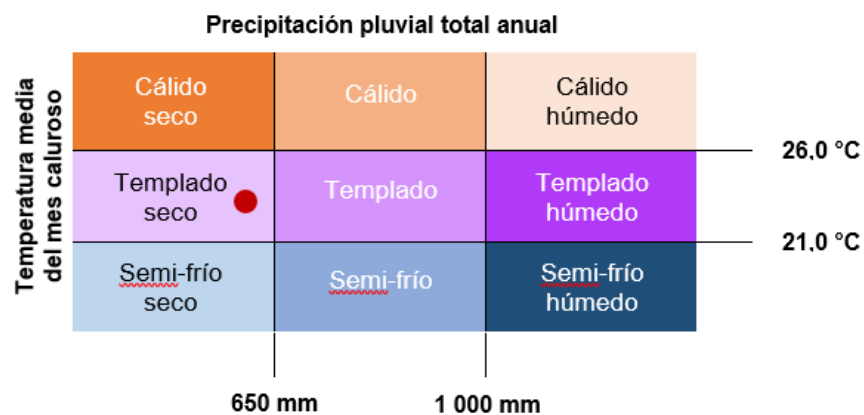
3.2.1. Clima de Ensenada B.C.

Los datos para el presente análisis climático se obtuvieron de la Estación Meteorológica Automática (EMA) BCO2_ P. López Zamora, durante un período de registro de 19 años y 8 meses comprendido de 2000 a 2019. La estación meteorológica se ubica en la ciudad de Ensenada, Baja California —coordenadas geográficas: latitud 31° 53' 29" N, longitud 116° 36' 12" W, altitud (m) 32 — y es dependiente del Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA). Tales datos fueron procesados a través de la Herramienta de Análisis Bioclimático "BAT" (Rincón-Martínez & Fuentes-Freixanet, 2014), que es una hoja de cálculo automatizada que traza y analiza diferentes parámetros y criterios con base a ecuaciones y diagramas desarrollados por diferentes autores alrededor del mundo (Auliciems, Szokolay, Givoni, ASHRAE, Olgay, Mahoney, entre otros).

El clima de la ciudad de Ensenada se clasifica como BSk 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, presencia de canícula. Además, para Fuentes (2004), es conveniente determinar la agrupación bioclimática del sitio en estudio, el cual pretende clasificar las localidades de acuerdo a los requerimientos arquitectónicos y bioclimáticos con el fin de complementarse mutuamente con la clasificación climática de Köppen-Geiger desde una perspectiva de diseño arquitectónico (Fuentes y Figueroa, 1990). Por lo tanto, la agrupación bioclimática local de la ciudad de Ensenada, corresponde al bioclima Templado seco, ya que la temperatura media del mes cálido (agosto) es 24,7 °C y la precipitación pluvial anual se muestra en 214,3 mm, lo que representa un régimen de lluvias bajo (Figura 22).

Figura 22. Sistema de agrupación bioclimática local



Nota: Gráfica elaborada a partir de la clasificación climática de Fuentes y Figueroa, (1990).

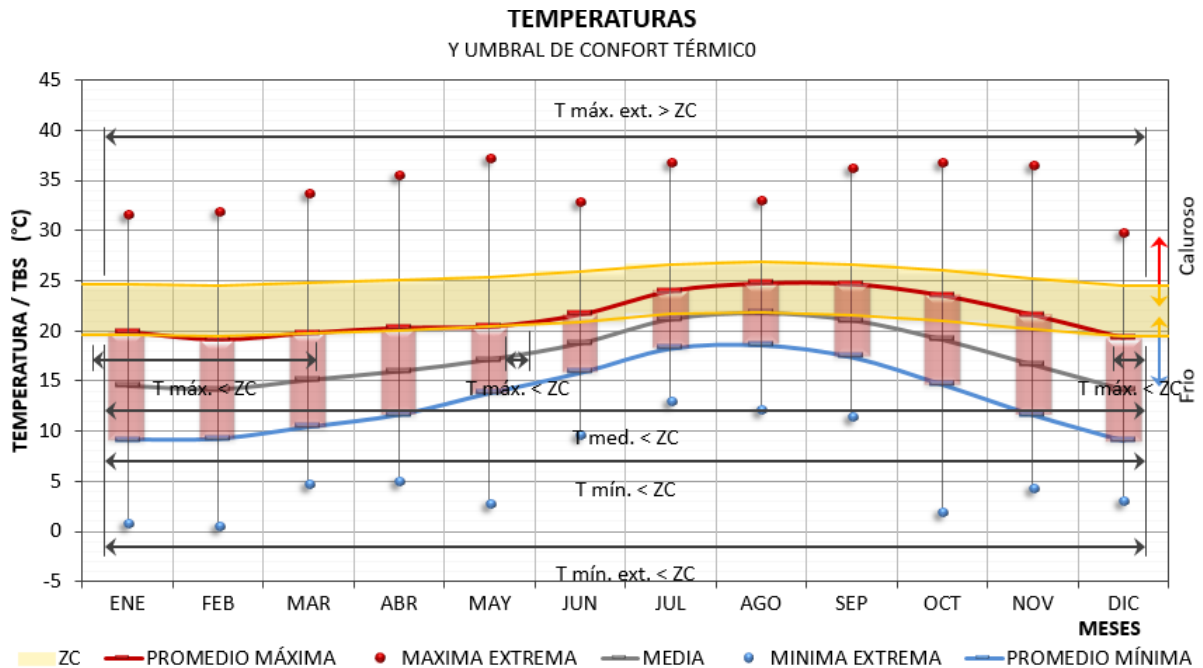
3.2.1.1. Temperatura

La temperatura óptima de confort anual —Temperatura Neutra (T_n)— es de 23,0 °C, con un rango aceptable (Zona de Confort) entre los 20,5 °C y 25,5 °C. La temperatura media (T_m) anual es de 17,4 °C; la media del mes cálido es de 21,7 °C en agosto y la media del mes frío es de 14,1 °C en diciembre.

De acuerdo con la Figura 23, las Temperaturas Máximas (T_{max}) se ubican dentro de la ZC en el periodo de junio a noviembre, las T_m en el mes de julio, agosto septiembre y las Mínimas (T_{min}) se encuentran por debajo de la ZC en todo el año. Asimismo, las Temperaturas Máximas Extremas ($T_{max\ ext}$) y Mínimas Extremas ($T_{min\ ext}$) —presentadas eventualmente a lo largo del periodo analizado— se

encuentran fuera de la ZC al ubicarse por encima del ZCs y por debajo del ZCi, respectivamente. El periodo de transición de cálido a frío se presenta del mes de octubre a diciembre, y el de frío a cálido en el mes de abril a agosto.

Figura 23 Comportamiento mensual de las temperaturas máximas, media y mínimas frente a la ZC del modelo de Auliciems y Szokolay



Nota: Gráfica elaborada en la BAT a partir de datos climáticos procesados. Elaborado mediante la BAT " Bioclimatic analysis tool: An alternative to facilitate and streamline preliminary studies" por Rincón-Martínez & Fuentes-Freixanet, (2014).

Al observar el comportamiento térmico horario anual, es posible apreciar que las condiciones de confort térmico, dan lugar de 13 h 00 a 18 h 00 en promedio. El mes de temperaturas más bajas se observa en diciembre, donde las condiciones de baja temperatura prevalecen en todo el día y es posible alcanzar temperaturas cercanas a los 9,0 °C durante las madrugadas. En el mes de diciembre, febrero, marzo y mayo las condiciones de confort térmico no son alcanzadas en ningún punto del día.

3.2.1.2. Humedad Relativa

De acuerdo con algunas investigaciones, el ser humano es poco sensible a los cambios de Humedad Relativa dentro del margen del 30,0 % al 70,0 %, y si éstos al realizarse se percibieran, se manifestarían como cambio de temperatura, aunque ésta permanezca constante (Sosa-Griffin, 2004). Con lo anterior, y por las condiciones climáticas que se presentan en la ciudad de Ensenada, el rango de confort hídrico que se ha determinado aplicar para el presente análisis climático oscila entre el 30,0 % y 70,0 %.

Por su parte, el análisis horario de la HR (Figura 24) no muestra una humedad baja (HB) en todo el año, es decir, no presenta niveles hídricos inferiores al 30,0 % (ZCi). Por otro lado, el 57,3 % del tiempo, se presentan niveles superiores al 70,0 % de HR (ZCs), lo que indica requerimientos de deshumidificación, principalmente en el periodo de las 04 h 00 a las 07 h 00 en todo el año. Asimismo, es de mencionar que el 42,7 % restante del año —principalmente durante las 14 h 00 a las 17 h 00— se presentan condiciones de confort al conseguir niveles variados que oscilan entre el 30,0 % y 70,0 %.

Figura 24. Comportamiento anual de la HR según los límites inferior (30,0 %) y superior (70,0 %) del confort hídrico

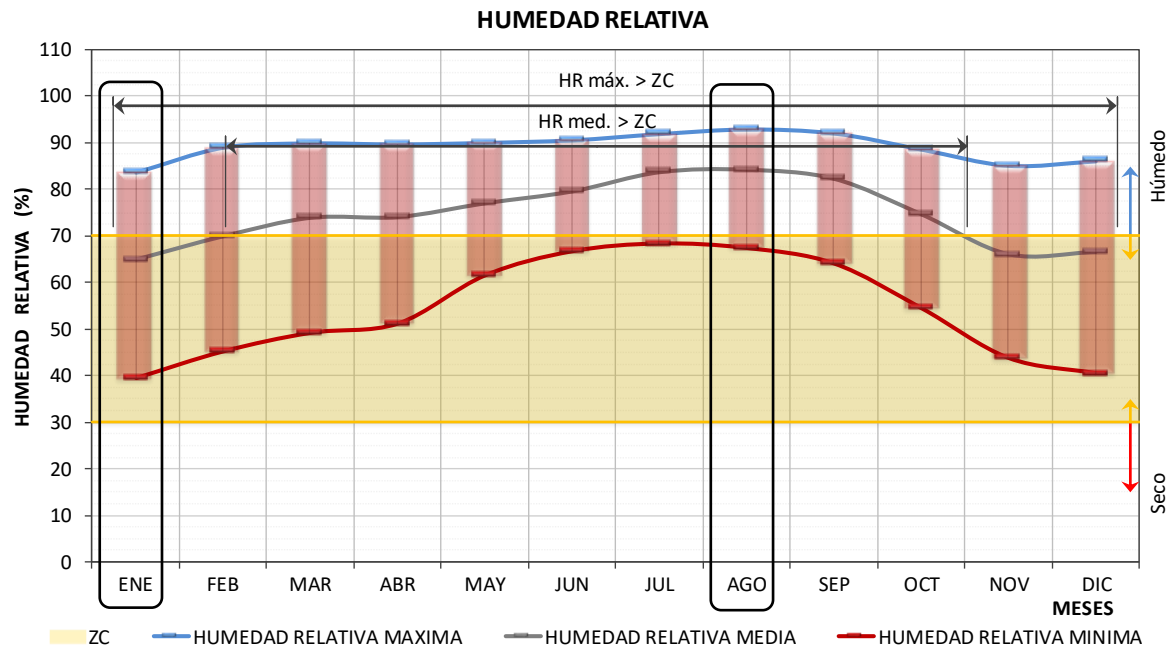
	Comportamiento hídrico	Total (%)
Humedad Relativa	Humedad baja (HB)	0,0%
	Confort (CF)	42,7%
	Humedad alta (HA)	57,3%

Nota. Tabla elaborada a partir de datos climáticos procesados del sitio en estudio.

Con base en los datos climáticos de la estación meteorológica señalada al inicio de este análisis, la Humedad Relativa Media (HRmed) anual para la ciudad de Ensenada, se pondera en 74,7 %. En el mes más seco (enero) se presenta una HRmed igual a 64,8 %, mientras que en el mes húmedo (agosto) una igual a 84,3 %. Cabe mencionar que la HR (máxima, media y mínima) es más alta durante los meses

más cálidos (julio a septiembre). La Figura 25 muestra el comportamiento mensual de la HR a lo largo del año. En la gráfica se aprecia que durante todo el periodo la Humedad Relativa Mínima (HRmin) se encuentra en el rango de la zona de confort, mientras que, solo en el periodo de noviembre a febrero la HRmed se encuentran dentro del rango. No obstante, la Humedad Relativa Máxima (HRmax) se encuentra fuera del rango prácticamente todo el año.

Figura 25. Comportamiento mensual de las HR mínima, media y máxima, frente a la ZC permisible que acepta un rango del 30,0 % al 70,0 %



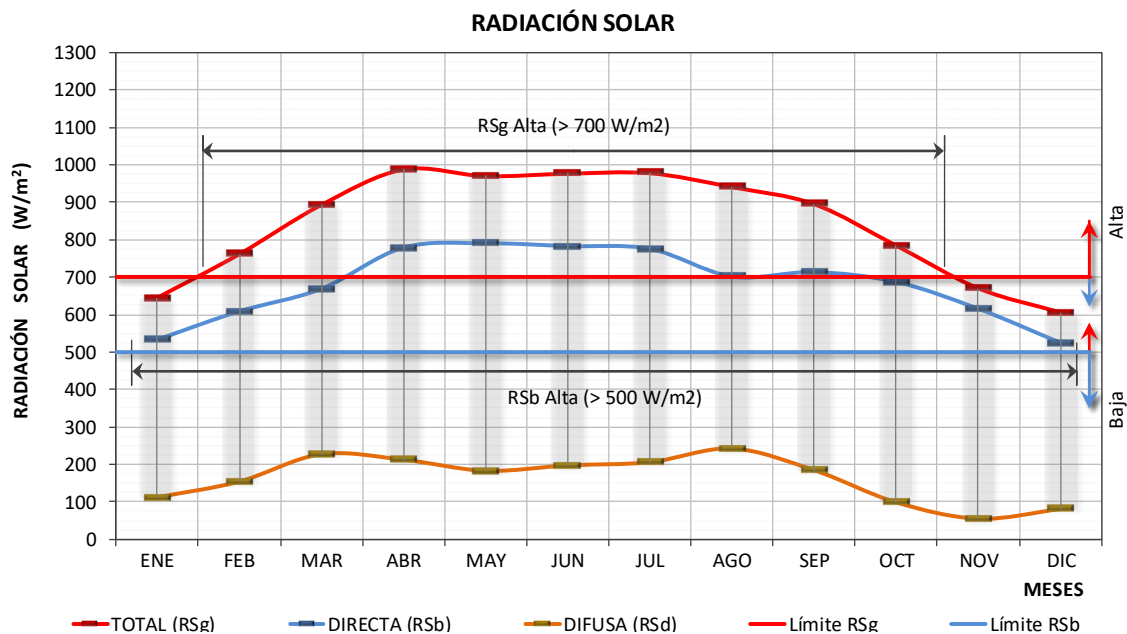
Nota. Gráfica elaborada en la BAT a partir de datos climáticos procesados. Elaborado mediante la BAT "Bioclimatic analysis tool: An alternative to facilitate and streamline preliminary studies" por Rincón-Martínez & Fuentes-Freixanet, (2014).

3.2.1.3. Radiación solar

De acuerdo con la Figura 10, la Radiación Solar Total (RSg) máxima promedio en la ciudad de Ensenada es alta la mayor parte del año (periodo de febrero a octubre), al presentar registros superiores a los 700,0 W/m². Abril destaca como el mes con mayor RSg del año (989,1 W/m²), mientras que diciembre como el mes con menor RSg con (605,0 W/m²).

Asimismo, la Radiación Solar Directa (RSb) máxima es alta durante todo el año al mantener niveles de radiación por encima de los 500,0 W/m². Mayo destaca con la RSb máxima promedio más alta, ésta correspondiente a 789,2 W/m²; por el contrario, diciembre se caracteriza por mostrar los valores más bajos nuevamente con 524,3 W/m². El comportamiento mensual de la radiación difusa (RSd) es baja.

Figura 26. Comportamiento mensual de las RSg, RSb y RSd máximas promedio respecto a los niveles aceptables de Radiación Solar —para aprovechamiento de energía renovable—



Nota: Gráfica elaborada en la BAT a partir de datos climáticos procesados. Elaborado mediante la BAT "Bioclimatic analysis tool: An alternative to facilitate and streamline preliminary studies" por Rincón-Martínez & Fuentes-Freixanet, (2014)

3.2.1.4. Viento

La Figura 27 muestra detalladamente la frecuencia y la velocidad del viento presentado a lo largo del año en la ciudad de Ensenada. Con ello se muestra de manera particular la dirección de los vientos a partir de su procedencia e intensidad durante el periodo comprendido entre 2000-2019.

Además de mostrar información de la frecuencia y la velocidad de los vientos por dirección, presenta el porcentaje en que éstos se ausentan a lo largo del año (calmas), así como las velocidades promedio y máximas por mes. En la parte inferior de la tabla se muestra información mensual y anual de los vientos dominantes y reinantes.

Figura 27. Desglose detallado del comportamiento de viento a lo largo del año a partir de su dirección, intensidad y periodo. Promedios mensual y anual del viento dominante y reinante durante el periodo observado, 2000-2019

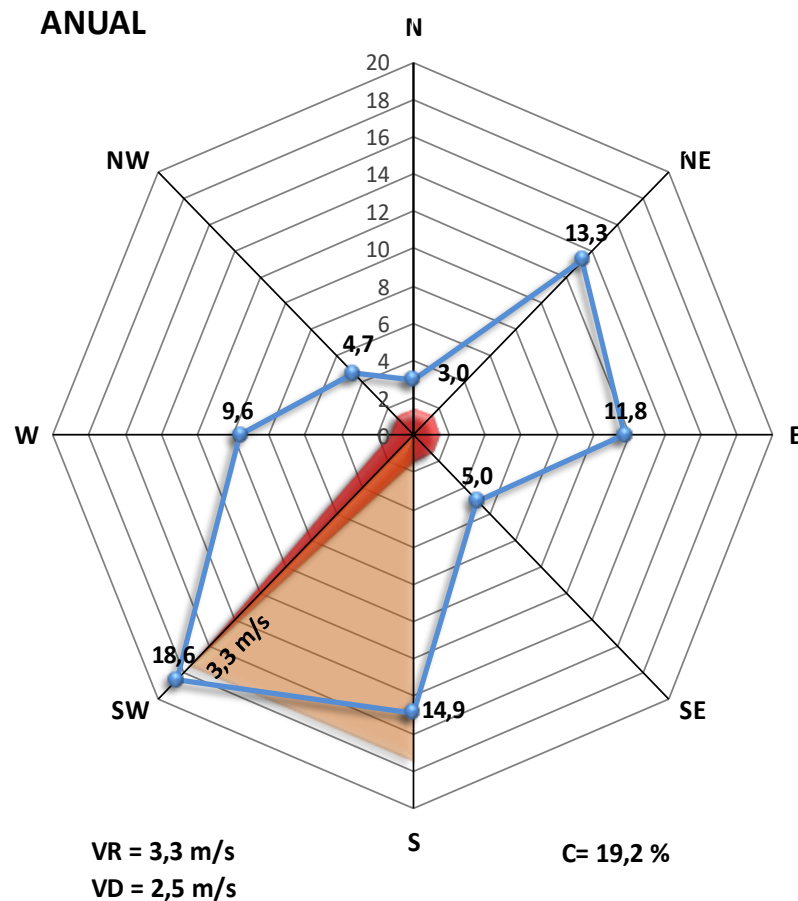
VIENTO MENSUAL (Frecuencia / Velocidad)													
MESES	PARÁMETRO	UNIDAD	DIRECCIONES								CALMAS (%)	PROMED.	MÁXIMA
			N	NE	E	SE	S	SW	W	NW			
ENERO	Frecuencia	%	3,2	18,9	18,1	6,2	8,7	11,6	7,9	5,2	20,2	10,0	18,9
	Velocidad	m/s	2,2	2,7	2,8	2,0	2,9	3,1	3,1	2,7			
FEBRERO	Frecuencia	%	3,6	17,0	15,1	5,5	9,0	13,6	8,4	5,4	22,3	9,7	17,0
	Velocidad	m/s	2,1	2,7	2,8	2,1	3,2	3,4	3,5	2,6			
MARZO	Frecuencia	%	4,0	15,6	13,3	5,5	11,5	14,9	10,7	5,5	19,0	10,1	15,6
	Velocidad	m/s	2,0	2,5	2,7	2,1	3,2	3,5	3,7	2,7			
ABRIL	Frecuencia	%	4,0	13,0	10,6	4,2	11,4	18,6	12,6	6,0	19,7	10,0	18,6
	Velocidad	m/s	2,1	2,3	2,4	2,0	3,2	3,8	4,0	2,8			
MAYO	Frecuencia	%	3,4	10,1	8,3	4,1	12,6	23,9	10,9	4,1	22,6	9,7	23,9
	Velocidad	m/s	1,9	2,3	2,3	1,9	3,1	3,8	3,6	2,4			
JUNIO	Frecuencia	%	3,1	7,6	6,1	4,1	19,5	26,9	7,8	3,4	21,5	9,8	26,9
	Velocidad	m/s	1,4	1,7	1,7	1,6	3,1	3,4	2,4	1,8			
JULIO	Frecuencia	%	1,4	5,6	4,7	2,5	28,4	25,2	8,4	2,1	21,8	9,8	28,4
	Velocidad	m/s	1,3	1,6	1,5	1,5	3,1	3,1	2,2	1,4			
AGOSTO	Frecuencia	%	2,0	8,6	5,9	3,3	28,6	27,2	8,7	2,2	13,6	10,8	28,6
	Velocidad	m/s	1,3	1,8	1,7	1,5	3,2	3,1	2,0	1,3			
SEPTIEMBRE	Frecuencia	%	2,3	11,1	9,3	3,4	17,9	21,5	11,0	3,4	20,1	10,0	21,5
	Velocidad	m/s	1,6	1,9	1,9	1,6	3,0	3,1	2,6	1,7			
OCTUBRE	Frecuencia	%	2,9	14,1	13,0	6,0	12,6	16,4	10,5	6,4	18,1	10,2	16,4
	Velocidad	m/s	1,8	2,3	2,2	2,0	3,0	3,3	3,3	2,4			
NOVIEMBRE	Frecuencia	%	2,7	19,0	17,5	7,5	9,9	13,0	9,9	5,8	14,8	10,6	19,0
	Velocidad	m/s	1,8	2,5	2,8	2,0	2,8	3,2	3,2	2,5			
DICIEMBRE	Frecuencia	%	3,0	18,8	19,4	7,6	8,5	10,4	8,5	6,8	17,0	10,4	19,4
	Velocidad	m/s	2,2	2,6	2,8	2,0	2,8	2,9	3,1	2,6			
ANUAL	Frecuencia	%	3,0	13,3	11,8	5,0	14,9	18,6	9,6	4,7	19,2	10,1	18,6
	Velocidad	m/s	1,8	2,2	2,3	1,9	3,1	3,3	3,0	2,2			

VIENTO	UNIDAD	MESES												ANUAL
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
DOMINANTE REINANTE		NE	NE	NE	SW	SW	SW	S	S	SW	SW	NE	E	SW
		W	W	W	W	SW	SW	SW	S	SW	SW	W	W	SW
MÁXIMA	m/s	3,1	3,5	3,7	4,0	3,8	3,4	3,1	3,2	3,1	3,3	3,2	3,1	3,3
PROMED.	m/s	2,7	2,8	2,8	2,8	2,6	2,2	2,0	2,0	2,2	2,5	2,6	2,6	2,5
CALMAS	(%)	20,2	22,3	19,0	19,7	22,6	21,5	21,8	13,6	20,1	18,1	14,8	17,0	19,2

Nota: Gráfica elaborada en la BAT a partir de datos climáticos procesados. Elaborado mediante la BAT " Bioclimatic analysis tool: An alternative to facilitate and streamline preliminary studies" por Rincón-Martínez & Fuentes-Freixanet, (2014)

En la Figura 28 se puede apreciar la rosa anual de vientos predominantes en la ciudad de Ensenada, donde se concentra información relacionada con el origen y la dirección de los vientos dominantes y reinantes. La rosa anual de vientos predominantes muestra que el 18,6 % de las frecuencias totales provienen del Suroeste (SW) y el 14,9 % del Sur (S), lo que indica que durante 33.5 % del año, los vientos dominantes provienen del rango S-SW. Cabe mencionar la procedencia del Noreste (NE) y el Este (E), con un 13,3 % y 11,8 % respectivamente, refiriendo en conjunto un 25.1% del tiempo anual.

Figura 28. Rosa anual de vientos dominantes y reinantes. Procedencia del viento a partir de promedios anuales por dirección



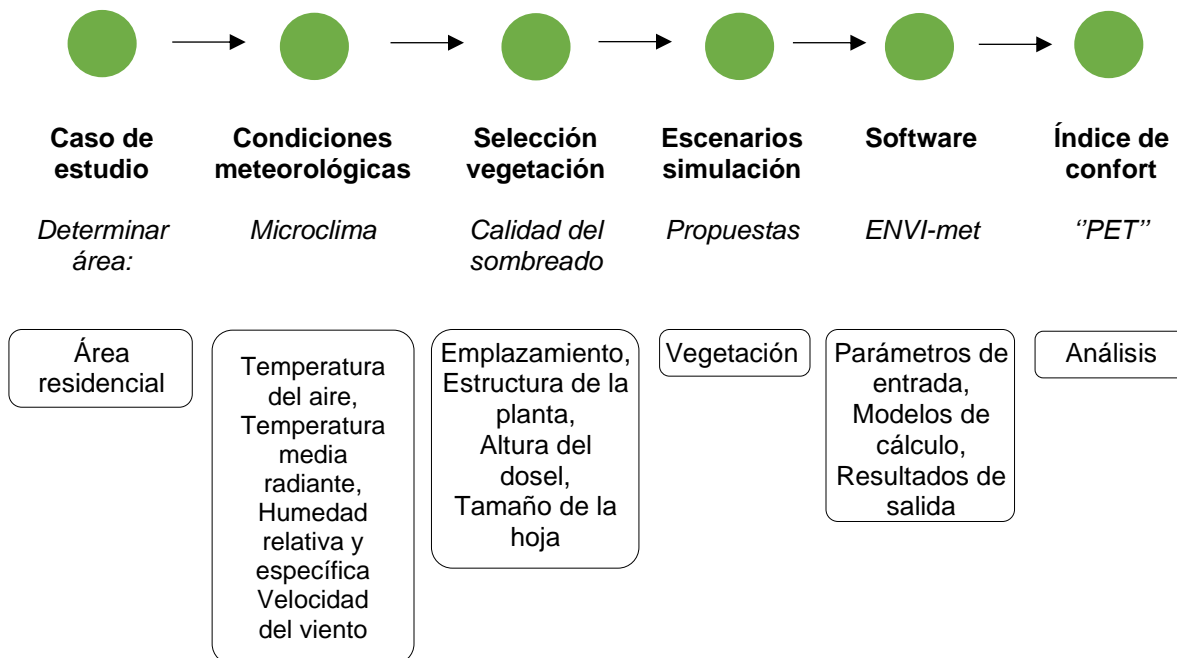
Nota: Gráfica elaborada en la BAT a partir de datos climáticos procesados. Elaborado mediante la BAT "Bioclimatic analysis tool: An alternative to facilitate and streamline preliminary studies" por Rincón-Martínez & Fuentes-Freixanet, (2014)

Asimismo, con menor frecuencia el recurso eólico proviene por el Oeste (W), Noroeste (NW), Norte (N) y Sureste (S), con 9,6 %, 4,7 %, 3,0 % y 5,0 % respectivamente, que en conjunto representan el 22,3 % del tiempo anual. Es de destacar que los vientos reinantes —con una velocidad promedio anual de 3,3 m/s— tienen origen en el Oeste (W), Suroeste (SW) y Sur (S), estas dos últimas orientaciones, coinciden con el origen de los vientos dominantes anuales con mayor asiduidad.

3.3. Descripción del caso de estudio

El caso de estudio fue seleccionado a través de un análisis de la relación existente entre las distintas áreas residenciales del centro de población de Ensenada y la magnitud de temperatura superficial. Tal análisis, fue realizado a través de la herramienta LANDSAT para la observación en alta resolución de la superficie terrestre. Después de seleccionar el sitio, se procedió a la obtención de datos meteorológicos, para utilizar como parámetros de entrada de la simulación en el software ENVI-met., los cuales se obtuvieron en campañas de monitoreo en sitio con Data Loggers, Marca HOBO, para registrar temperatura y humedad del lugar. Posteriormente se determinó la especie de vegetación a través de la consulta del PDUCP de Ensenada, para simular la situación actual del sitio y distintos escenarios alternativos e identificar los niveles de confort térmico exterior. Los datos de salida de ENVI-met, permitieron analizar el confort térmico del sitio. En este caso, el índice que se utilizó para estimar el confort térmico, fue el PET "Temperatura Fisiológica Equivalente" (Figura 29).

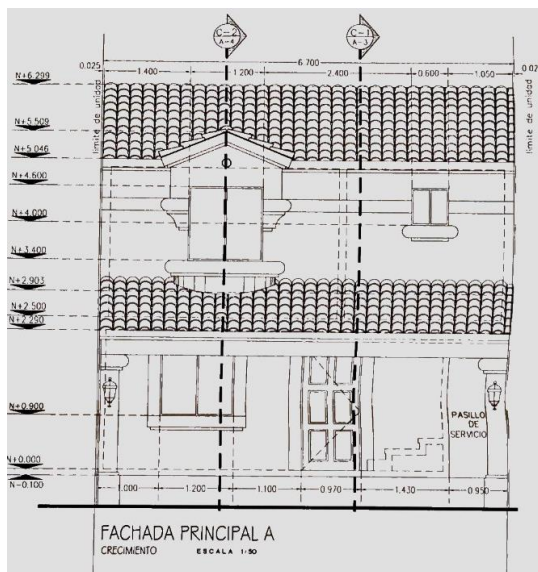
Figura 29. Diagrama metodológico general de la investigación



3.4. Unidad de análisis

En el presente trabajo, el lugar elegido como unidad de análisis fue el área residencial Villas del Cedro, Fraccionamiento del Sol, 22820 en Ensenada, B.C., México—coordenadas geográficas: latitud 31°54'15.7" N, longitud 116°34'58.5" W—, que corresponde al sitio que presentaba valores de temperatura superficial entre los 30,7 °C y los 32,9 °C . Cuenta con una superficie total de 16,948.63 m² y se identifica por ser un área proyectada por Urbi "Villa residencial" con un prototipo de casa de interés social de dos niveles, estacionamiento para dos automóviles y construidas con concreto armado en 107,20 m² de superficie de terreno (Figura 30).

Figura 30. a) Plano de la fachada principal del prototipo de casa de interés social de Urbi "Villa Residencial", b) Fotografía tomada en el área de estudio



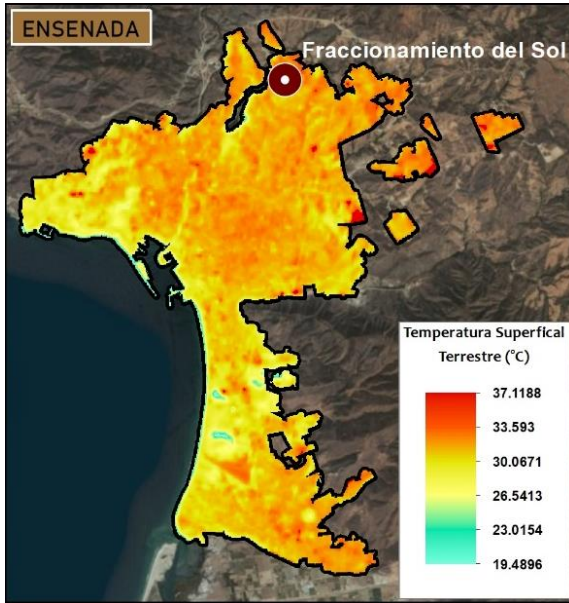
a) Planimetría de fachada



b) Fotografía de fachada

Como se menciona en la descripción del caso de estudio, el fraccionamiento fue elegido a través de un análisis de temperatura superficial por medio de una imagen de la ciudad de Ensenada obtenida del satélite LANDSAT 8 (Figura 31), la unidad de análisis seleccionada corresponde a un prototipo de vivienda de interés social, el cual es replicado en distintas áreas de la ciudad. El permiso de acceso al lugar también consistió en un factor determinante para su elección, ya que la campaña de monitoreo fue realizada en período de pandemia por la enfermedad por coronavirus (COVID 19).

Figura 31. Imagen de unidad de análisis de Landsat 8 con sensor OLI/TIRS combinado.
 Fecha de adquisición el 03 de julio del 2019



Mesoescala



Microescala

3.5. Monitoreo

3.5.1. Instrumentación

Como se muestra en la Figura 32, para la realización de la campaña de monitoreo, fue necesaria la utilización de Data Loggers y su protector de radiación solar directa, marca Acurite, para registrar temperatura y humedad en sitio.

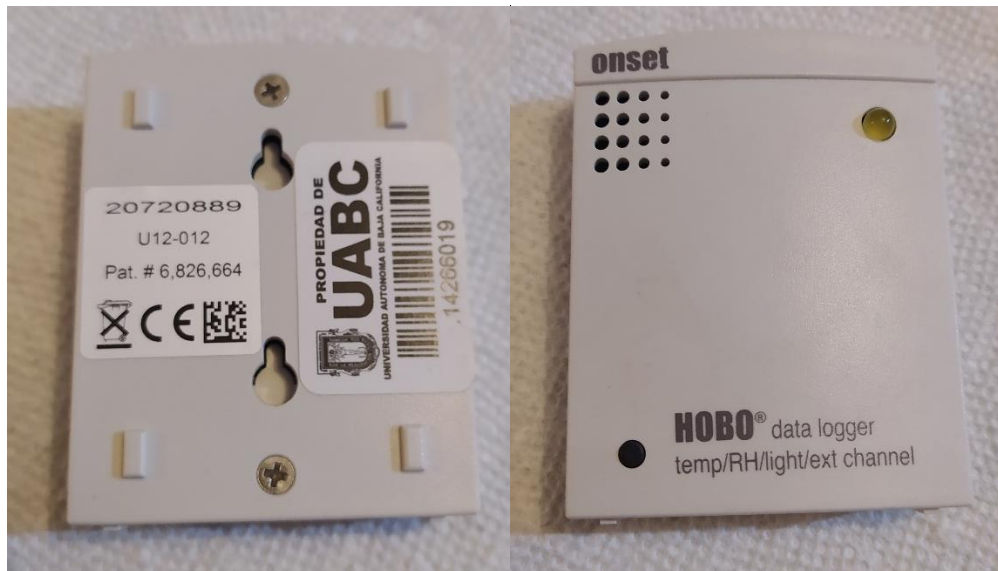
Figura 32. a) Data Logger, Marca HOB0, b) Protector, Marca Acurite



3.5.1.1. Características y especificaciones de Data Logger

El HOBO U12-006 data logger (Figura 33), cuenta con una resolución de 12 bits proporciona alta precisión, inicio programable y con pulsador y una interfaz USB directa para facilitar la descarga rápida de datos. Este producto detecta una mayor variabilidad en los datos registrados y almacena hasta 64K bytes (43,000 mediciones de 12 bits); y sus dimensiones son 58 x 74 x 22 mm (ONSET ©, 2021).

Figura 33. HOBO U12-006 data logger

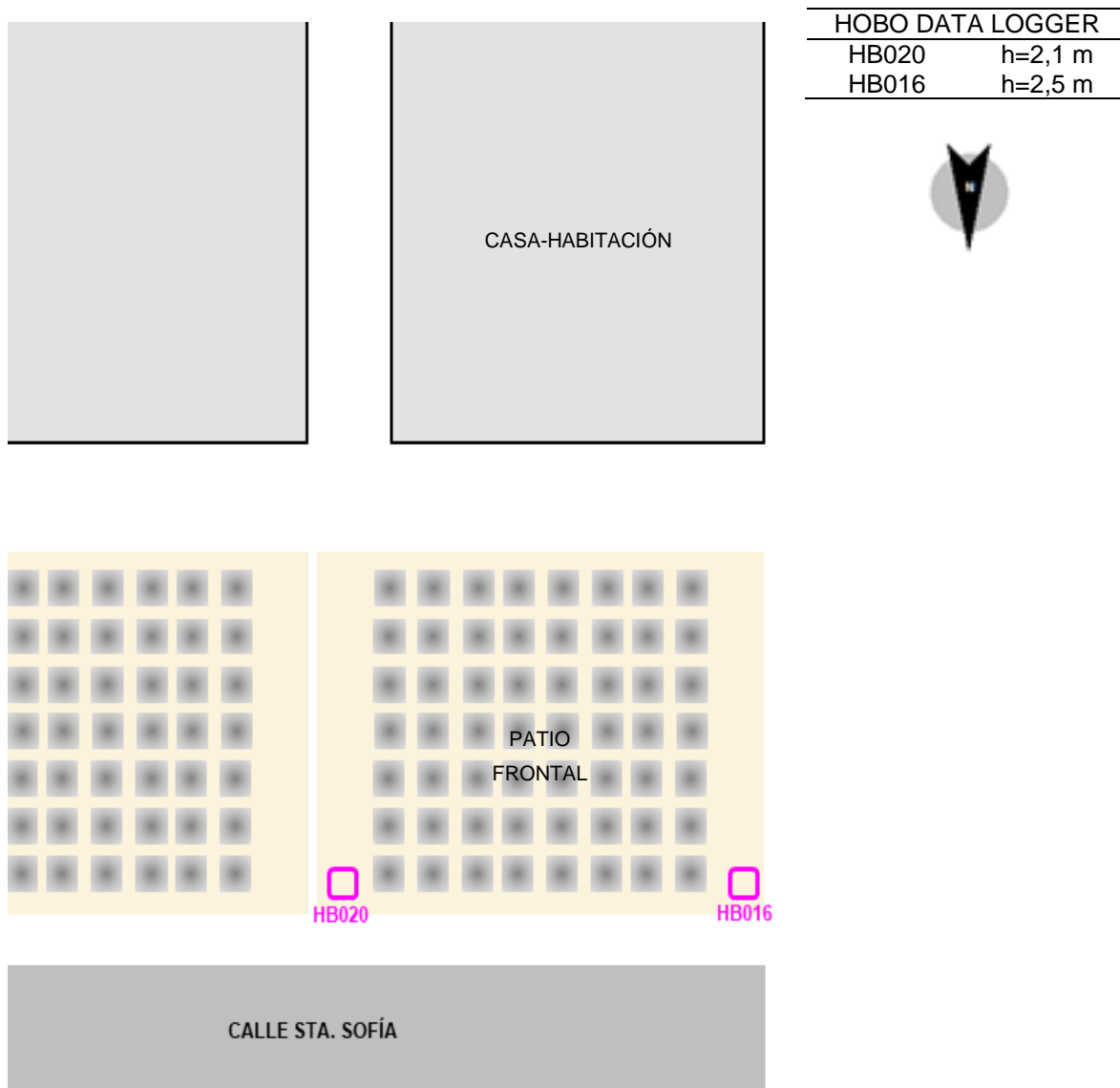


Cuenta con canales analógicos de 0 a 2,5 Vdc (con CABLE-2.5-STEREO); 0 a 5 Vcc (con CABLE-ADAP5); 0 a 10 Vcc (con CABLE-ADAP10); 4-20 mA (con CABLE-4-20MA). Presenta una precisión (solo registrador): $\pm 2 \text{ mV} \pm 2,5\%$ de la lectura absoluta; $\pm 2 \text{ mV} \pm 1\%$ de lectura para sensores alimentados por registradores. Resolución: 0,6 mV. La frecuencia de muestreo es de 1 segundo a 18 h 00 , seleccionable por el usuario; la precisión de tiempo es de ± 1 minuto por mes a 25 ° C (77 °F), con un rango de funcionamiento de -20 a 70 °C (-4 ° a 158 °F). La Temperatura de funcionamiento: registro es de -20 ° a 70 °C (-4 ° a 158 °F); 0 a 95% RH (sin condensación); lanzamiento / lectura: 0 ° a 50 °C (32 ° a 122 °F), según especificación USB. El Rango de humedad que abarca es de 0 a 95% de HR, sin condensación y la duración de la batería es de 1 año de uso típico (ONSET ©, 2021).

3.5.2. Ubicación de la instrumentación

Para la obtención de datos meteorológicos fue realizada una campaña de monitoreo en sitio con Data Loggers, Marca HOBO, encargados de registrar temperatura y humedad. Tal monitoreo tuvo lugar en la calle Sta. Sofía, en la casa-habitación, núm. 225, donde fueron instalados 2 Data Loggers (HB020 y HB016) en el patio frontal, a una altura de 2,1 y los 2,5 m (Figura 34). Las especificaciones de colocación fueron determinadas a través de la revisión del estado del arte, donde se establecen especificaciones conforme a la percepción peatonal.

Figura 34. Ubicación de Data Loggers en casa-habitación del área de estudio



3.5.3. Monitoreo y calibración

La campaña de monitoreo en sitio se realizó desde el día 28 de agosto del 2020, hasta el 04 de octubre de 2020. Los datos seleccionados para la calibración y análisis de la información para esta investigación, corresponden a los del día 04 de octubre del 2020, debido a que ese día presentó condiciones con poca velocidad de viento (~2 m/s), fue un día despejado y sin nubosidad. Una vez obtenidos los datos se seleccionaron los registros obtenidos mediante el HOBO HB016 que corresponde al equipo instalado en una zona sin vegetación y que por lo tanto corresponden a los valores más altos de temperatura (°C) y humedad (%) (para consultar los datos medidos de HB016 y HB020, ver **Apendice A**).

En estudios anteriores, se realizaron mediciones de campo para validar el modelo ENVI-met, comparando los valores simulados con medidas tomadas en sitio (Abdi et al., 2020). Para realizar la validación del modelo numérico de ENVI-met, se procedió a contrastar los datos de temperatura del aire a partir de los resultados de la simulación de las 01 h 00 a las 23 h 00 del 04 de octubre del 2020; y de los datos registrados en la campaña de monitoreo el mismo día, a una escala peatonal de 1,5 m. Para validar el modelo es necesario calcular el error cuadrático medio (RMSE) y error absoluto medio (MAE) de la Tair, que de acuerdo a Zhao et al., (2018) suele encontrarse entre 1 y 2 °C. Para calcular el RMSE y MAE se utilizan las siguientes formulas:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}}$$

Ec. 13.

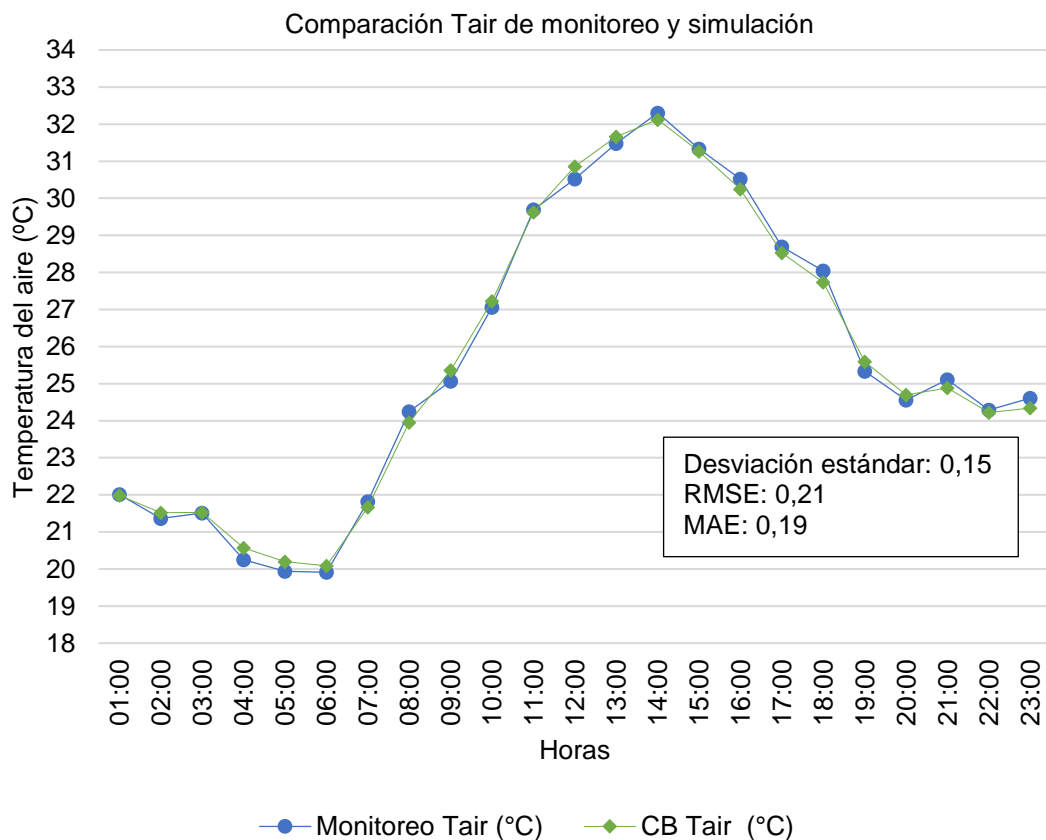
$$\text{MAE} = \frac{\text{SAE}}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - \hat{x}_i|}{N}$$

Ec. 14.

donde x_i son las observaciones actuales de las series de tiempo, \hat{x}_i es la serie de tiempo estimada o pronosticada, SAE es la suma de los errores absolutos (o desviaciones) y N es el número de puntos de datos no faltantes.

Como muestra la Figura 35, la curva de temperatura de aire observada (Monitoreo Tair) con la simulada (CB Tair) a una altura peatonal muestra una buena predicción del comportamiento térmico del día evaluado, con una desviación estándar= 0,15, un valor de RMSE de 0,21 y un valor de MAE de 0,19. El valor mínimo de Monitoreo Tair (19,91 °C) se muestra menor que el de CB Tair (20,09 °C), al contrario que el valor de la máxima, donde Monitoreo Tair presenta el valor más alto (32,30 °C) en comparación con CB Tair (32,12 °C).

Figura 35. a) Gráfico de ajuste del dato monitoreado y el simulado el día 4 de octubre del 2020 a escala peatonal (1,50 m) en el área de estudio, b) Datos de mínima, máxima y la media



a)

Temperatura del aire	Monitoreo Tair	CB Tair
Min (°C)	19,91	20,09
Max(°C)	32,30	32,12
Media (°C)	25,63	25,64

b)

3.5.4. Día Típico

Debido a que la campaña de monitoreo realizada no corresponde al mes representativo de la temporada cálida, se procedió a determinar un día típico para simular el CB y el mejor escenario de la configuración de vegetación. Mediante el análisis climático de la ciudad de Ensenada, B.C., a través de herramienta la BAT, desarrollada por Rincón-Martínez & Fuentes-Freixanet, (2014), con los datos obtenidos de la estación meteorológica Emilio Lopez Zamora; se identificó que el mes de Agosto es el más cálido del año, con una temperatura promedio anual máxima de 24,7 ° C y una promedio anual mínima de 18,6 °C.

Una vez identificado el mes más cálido, se procedió a definir el día típico mediante el cálculo de la mínima sumatoria mensual de las diferencias absolutas de dos de sus variables climáticas.

1) La oscilación térmica promedio diaria (Osc_{md}) respecto a la oscilación térmica promedio mensual (Osc_{mm}) y;

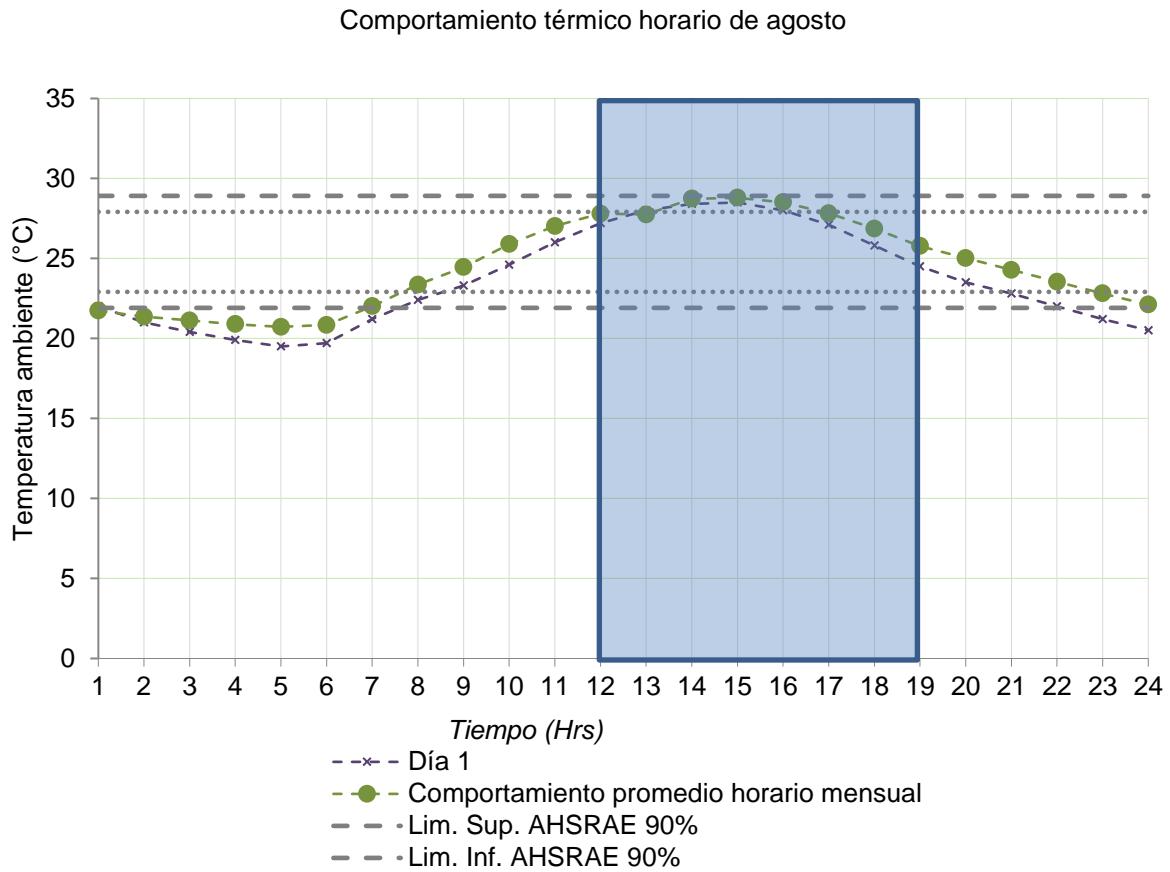
2) La Temperatura de Bulbo Seco promedio diaria (T_{md}) respecto a la Temperatura de Bulbo Seco promedio mensual (T_{mm}).

A este día se le denominó “Día Típico Mensual” D_{tm} y se le identificó por medio del uso de la Ec. 15.

$$Ec. 15. D_{tm} = \sum [abs(Osc_{md} - Osc_{mm}) - abs(T_{md} - T_{mm})] \Rightarrow D_{tm} \cong 0$$

A partir de una revisión y análisis de temperaturas diarias del mes de Agosto, se estableció el día típico representativo del período cálido, que fue el 01 de agosto. En la Figura 36, se visualiza el comportamiento térmico de día 01 (día típico), en comparación con el comportamiento promedio mensual, donde el valor de temperatura mínimo promedio fue de 19,5 °C, y el máximo promedio fue de 28,5 °C.

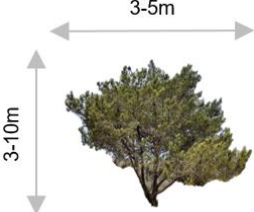
Figura 36. Comportamiento térmico horario de agosto



3.6. Caracterización de la vegetación

Para la elección de la vegetación a utilizar en los escenarios de simulación, se revisó en el Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población (PDU) 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 15), fue seleccionado como árbol de sombreado para las simulaciones, el *Cupressus forbesii* (Cipres), localizados en el Cañón de Doña Petra (Santos, Miguel, & Banda, 2019). Las características de la vegetación será simulada a través del módulo Albedo de ENVI-met, para determinar su impacto en el microclima.

Tabla 15. Características de la vegetación para utilizar en la simulación

	Especie	Tipo de hoja	Altura (m)	Diámetro del tronco (m)	Ancho de la corona (m)
	<i>Cupressus forbesii</i> (Cipres)	Perenne	3,00	N/A	3,00

Nota. Adaptado de

[\(https://www.conifers.org/pi/Pinus_attenuata.php#:~:text=Tree%20to%2024%20m%20tall,shoots%20slender%2C%20red%2Dbrown\),](https://www.conifers.org/pi/Pinus_attenuata.php#:~:text=Tree%20to%2024%20m%20tall,shoots%20slender%2C%20red%2Dbrown),)
[\(https://www.laspilitas.com/nature-of-california/plants/227--cupressus-forbesii\),](https://www.laspilitas.com/nature-of-california/plants/227--cupressus-forbesii)
[\(https://enciclovida.mx/especies/167315-populus-fremontii\)](https://enciclovida.mx/especies/167315-populus-fremontii)

3.8. Simulación

3.8.1. Escenarios de simulación

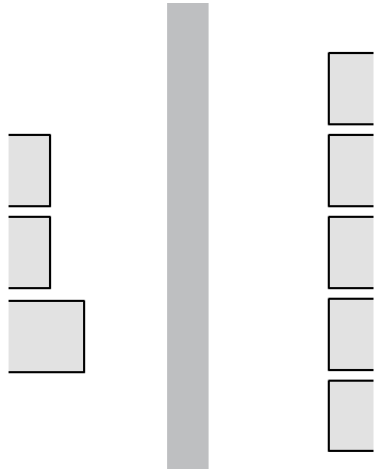
Para comparar cómo el emplazamiento y arreglos de los árboles de sombreado influyen en los microclimas exteriores, se seleccionó la calle Sta Sofía de Villas del Cedro para realizar la simulación. Se propusieron distintos escenarios, primeramente el caso base (CB) donde se analizó la situación actual del área de estudio, para proceder con escenarios donde se propusí la especie de vegetación (*Cupressus forbesii*) en las aceras frontales a los predios. En la Tabla 16 se muestra la propuesta de configuraciones. La configuración 1 con *Cupressus forbesii* (C1CU) presentó una disposición de árboles en intervalos individuales de 7,0 m con un número de 10 árboles; la configuración 2 con la misma especie de vegetación (C2CU) presentó una disposición de árboles en intervalos individuales de 14,0 m de distancia y un número de 5 árboles; la configuración 3 (C3CU) presentó una disposición agrupada (1,0 m de distancia entre troncos) con dos árboles a 14,0 m de distancia entre agrupaciones y un número de 20 árboles; por último la configuración 4 (C4CU) presentó una disposición agrupada (1,0 m de distancia entre troncos) con dos árboles a 14,0 m de distancia entre agrupaciones y un número de 10 árboles.

Tabla 16. Escenarios de simulación numérica

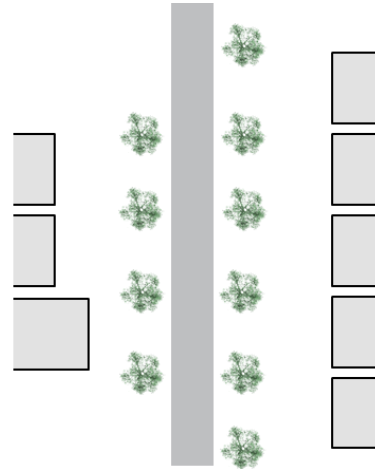
Escenarios	Disposición de árboles	Distancia (m)	Número de árboles	Especie de árbol
CB	N/A	0	N/A	N/A
C1CU	Intervalo individual	7,0	10	Cupressus forbesii
C2CU	Intervalo individual	14,0	5	Cupressus forbesii
C3CU	Agrupado	7,0	20	Cupressus forbesii
C4CU	Agrupado	14,0	10	Cupressus forbesii

Como se muestra en la Figura 37, las distancias que definieron el patrón de plantación, fueron determinadas a partir del ancho de un terreno (7,0 m) y la suma del ancho de dos (14,0 m), perteneciente a las casas de Villas del Cedro.

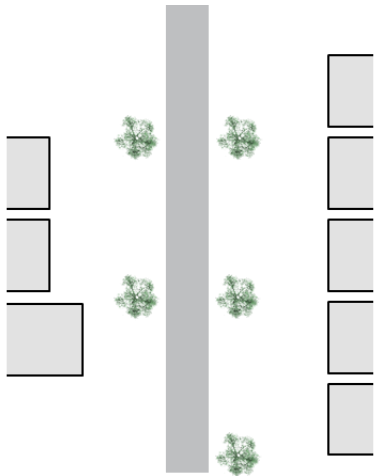
Figura 37. Patrones de plantación de árboles



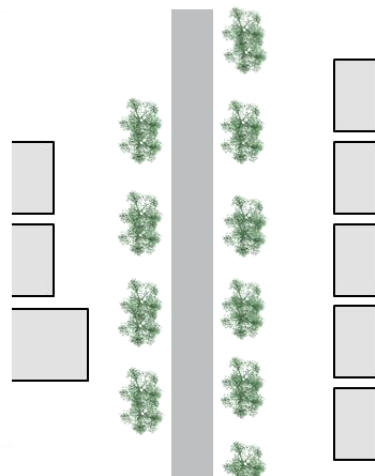
No hay árboles (CB)



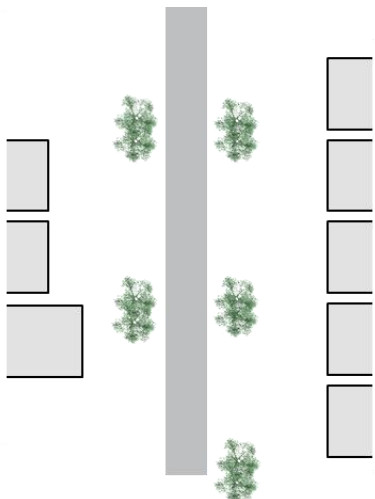
Distancia entre árbol 7,00 m (C1CU)



Distancia entre árbol 14,00 m (C2CU)



Distancia entre agrupaciones 7,00 m (C3CU)



Distancia entre agrupaciones 13,00 m (C4CU)

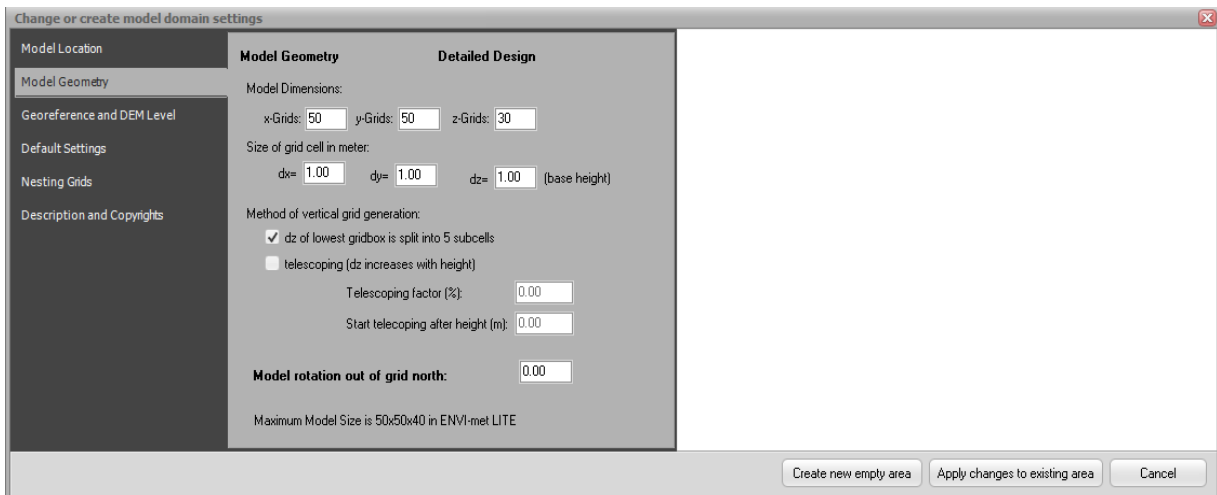
3.8.2. Software

La herramienta de simulación ENVI-met trabaja a escala de microclima urbano. Los datos de configuración son parámetros de entrada que caracterizarán las condiciones de borde de la simulación, tales como: parámetros meteorológicos, parámetros del modelo geométrico y parámetros de diseño. Estos parámetros sirven para generar módulos (construcción, vegetación y del suelo), que posteriormente proporcionan información de una evaluación analítica, es decir, parámetros básicos del entorno, Índice de evaluación (PET) y un proceso visual (cartografía).

3.8.3. Configuración de ENVI-met

Para iniciar con la simulación fue necesario determinar los parámetros de configuración de ENVI-met, los cuales se describen a continuación. El dominio completo del área de estudio de ENVI-met (GRID) fue de 50 x 50 x 30 m (x, y, z), con una resolución de cuadrícula vertical y horizontal de 1,0 m. Para asegurar la estabilidad de la simulación, se agregaron 2 cuadrículas de anidación (2 m) fuera del dominio del área de estudio horizontal (Figura 38).

Figura 38. Ajustes del dominio del modelo



Nota. Imagen extraída de ENVI-met.

En la Tabla 17 se consideran los parámetros para realizar la simulación del 04 de octubre del 2020 y el día típico (1 de agosto), se consideraron 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 y humedad; y cíclicas para la turbulencia (Tabla 17).

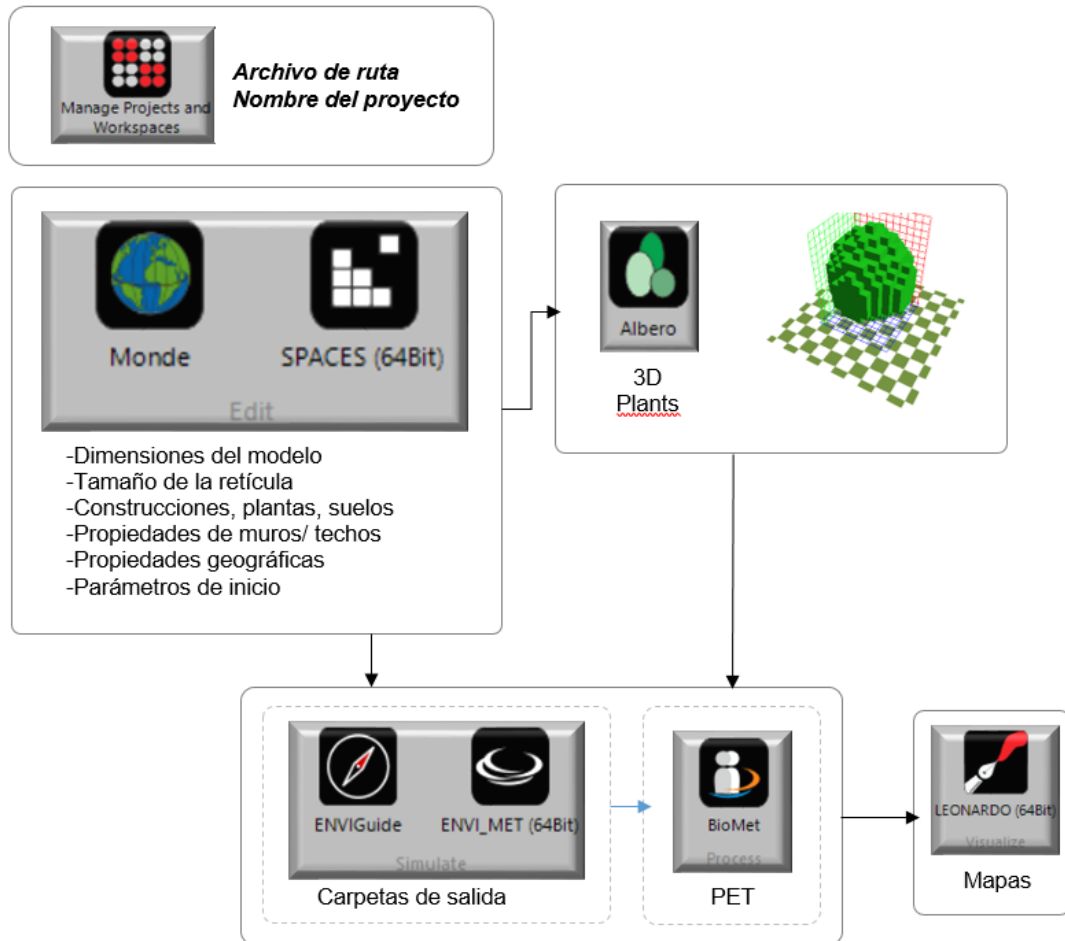
Tabla 17. Resumen de parámetros de configuración y entrada de área para simulación validada

Parámetro	Definición	Valor de entrada
<i>Localización</i>	Ensenada, Baja California, México Latitud, Longitud	31°54'15.7" N, 116°34'58.5" W
<i>Condiciones meteorológicas</i>	Temperatura inicial de la atmosfera (°C)	19,91 (min.), 32,30 (max.)
	Humedad relativa en 2 m (%)	22,59 (min.), 66,12(max.)
	Dirección del viento (deg)	90,00
	Velocidad del viento en 10 m (m/s)	2,50
	Cobertura de nubes	0.00
<i>Información de edificios / carreteras</i>	Longitud de rugosidad en el punto de referencia (m)	0.010
	Orientación de la calle	NO-SE
	Ancho de la calle (m)	8
<i>Condiciones de límite lateral (LBC)</i>	LBC para temperatura y humedad	Forzado
	LBC para turbulencia	Cíclico

3.8.4. Módulos

La Figura 39 muestra los módulos utilizados en este trabajo para simular los parámetros del microclima a través de ENVI-met. El proceso metodológico incluyó el modelado (spaces) y simulación de los escenarios (ENVIGuide y ENVI_MET), la creación de especies de vegetación 3D (Albero), se obtuvieron datos microclimáticos a partir de la simulación, un análisis del confort térmico a través del índice PET (BioMet) y finalmente la evaluación de los archivos de resultados mediante su visualización en mapas (Leonardo).

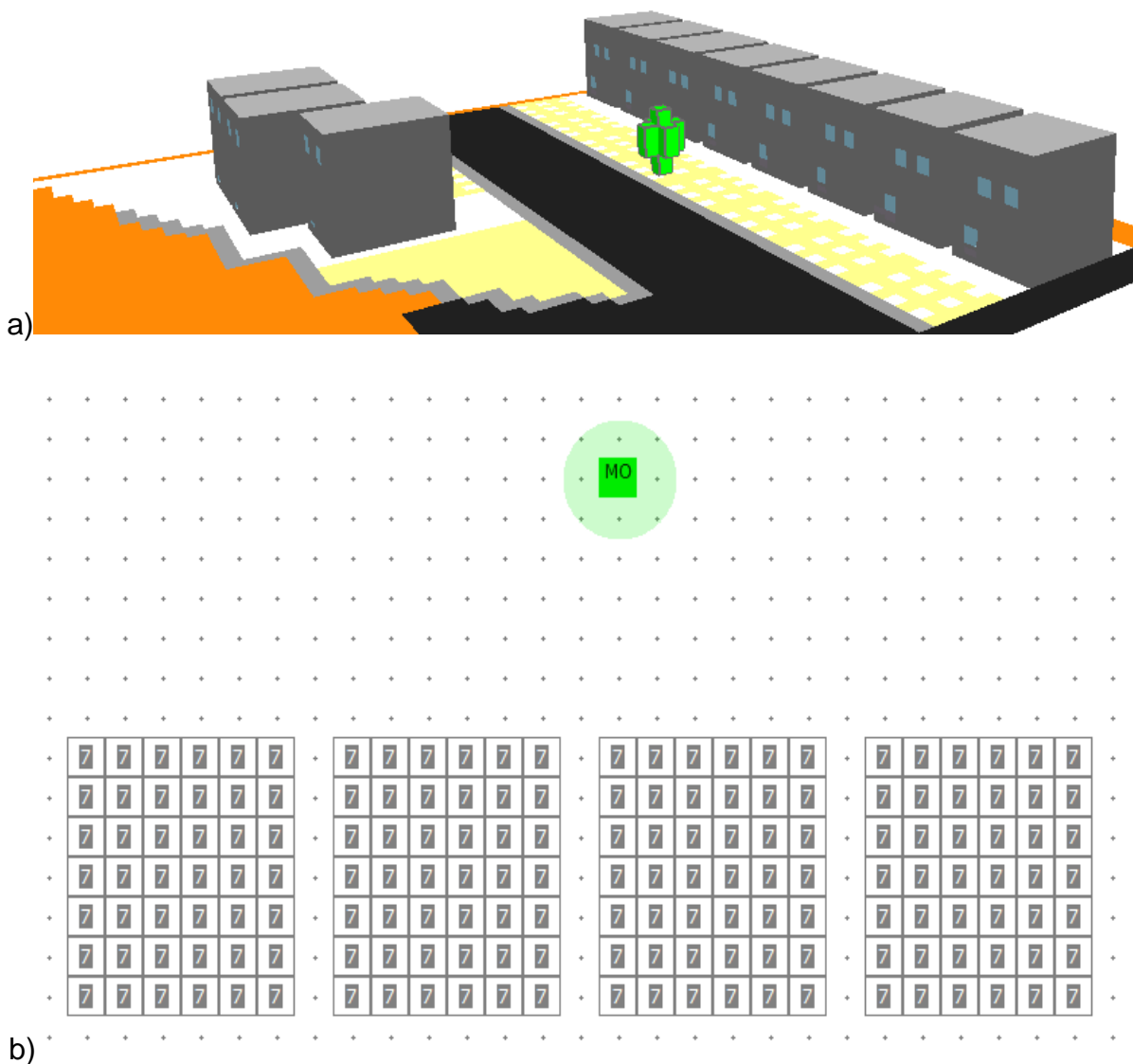
Figura 39. Módulos de trabajo de ENVI-met



3.8.4.1. Spaces

Esta herramienta permite a los usuarios crear las áreas de modelo necesarios para ejecutar una simulación. Hay una variedad de posibilidades para modelar elementos como edificios, vegetación, superficies y contaminantes. En este módulo fue creado el modelo 3D donde se implementaron las distintas configuraciones de vegetación (Figura 40).

Figura 40. a) Modelo creado en módulo 3D view "Spaces" en ENVI-met, b) Vista del modelo en apartado vegetation del módulo "Spaces" en ENVI-met

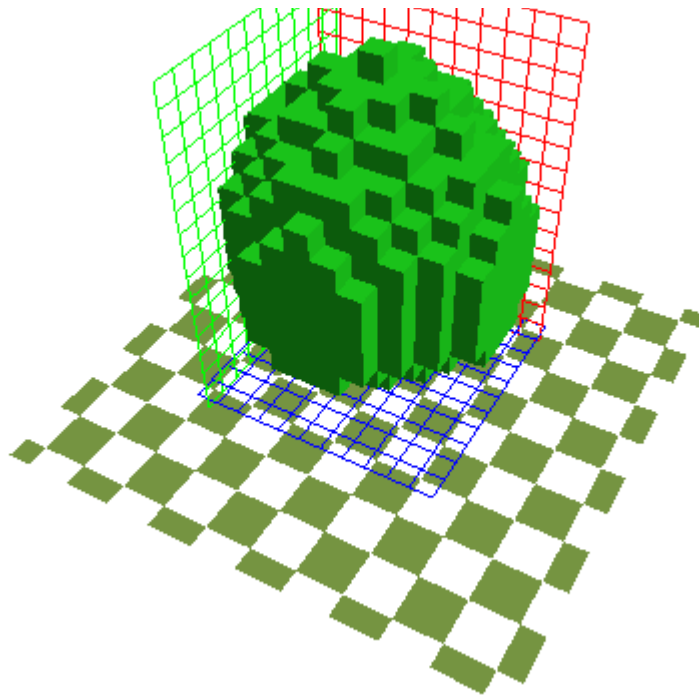


Nota. Imágenes extraídas de ENVI-met.

3.8.4.2. Albero

Albero es el módulo que permitió recrear las especies propuestas para el experimento. Es una herramienta donde el usuario puede simular vegetación de manera tridimensional y administrar tanto sus propiedades como su apariencia (Figura 41). Esto también permite elaborar plantas nuevas para reconstruir especies de interés específico, teniendo en cuenta características como la forma de la raíz, el tamaño del dosel, el índice de área de la hoja, el albedo de la hoja y la capacidad de distinguir entre especies de hoja perenne y caducifolias (ENVI-met, 2021).

Figura 41. Caracterización de los árboles de sombreado en módulo "Albero"



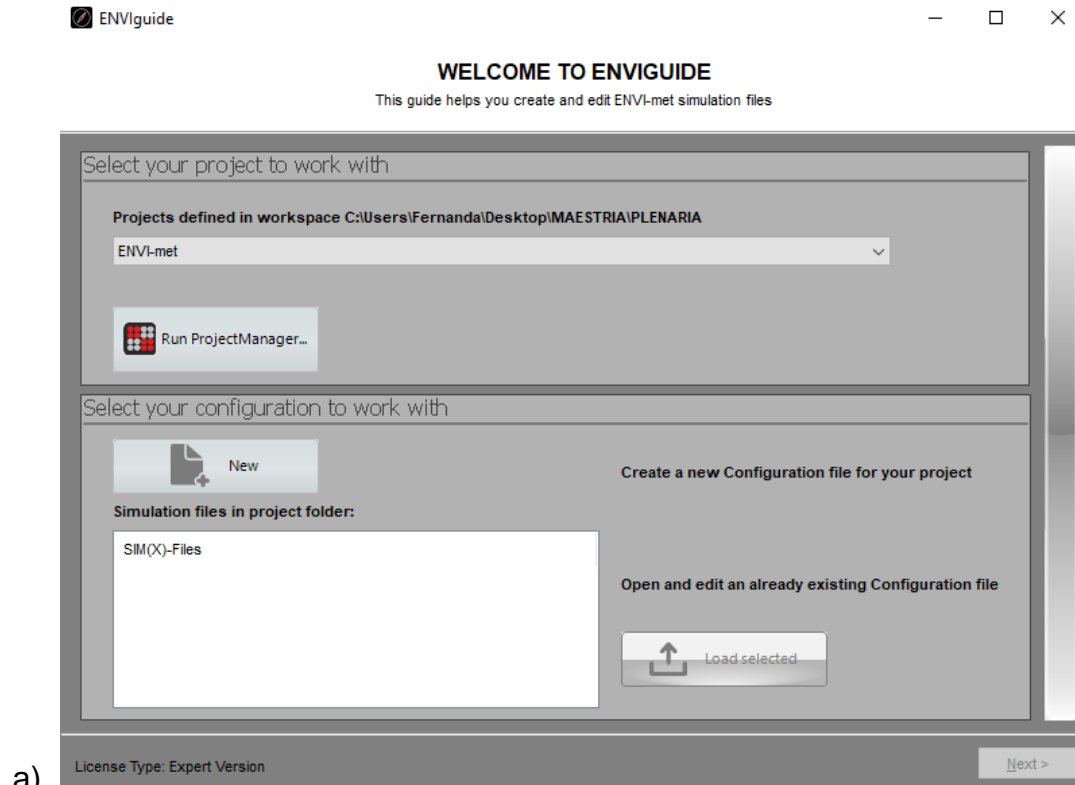
Nota. Imagen extraída de ENVI-met.

3.8.4.3. EnviGuide

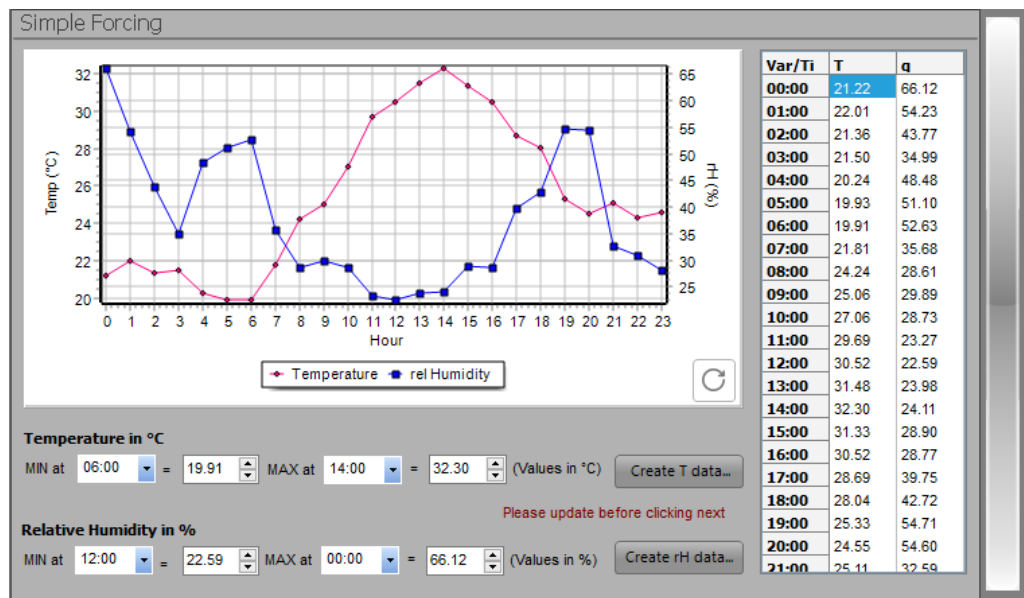
Posterior a la modelación e introducción de archivos climáticos, es necesario ingresar al módulo ENVIGuide para iniciar con la simulación, donde se carga el modelo y se especifica el inicio, la duración y el nivel de experiencia (principiante, intermedio y avanzado) dependiendo de los datos de salida que se requieren (Figura 42). En este apartado fue donde fueron introducidos los datos de temperatura y

humedad por hora extraídos de la campaña de monitoreo para trabajar con las condiciones reales del clima, del día 04 de octubre del 2020 y los datos del archivo EPW para el día típico.

Figura 42. a) Pantalla de inicio para cargar proyecto de ENVIGuide, b) Introducción de datos microclimáticos



a)



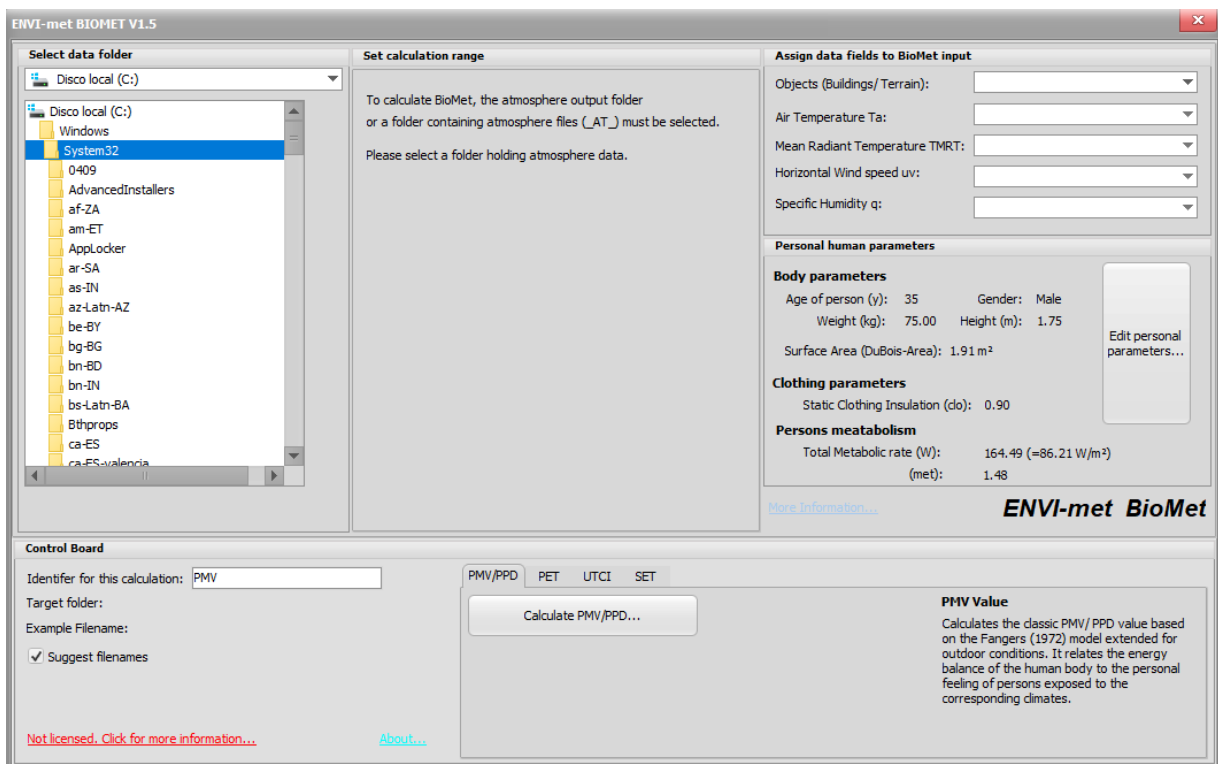
b)

3.8.4.4. BioMet

BioMet es el módulo de post-procesador para calcular índices de confort térmico humano a partir de archivos de salida del modelo ENVI-met (Figura 43). 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 con ropa de primavera / otoño se selecciona para el cálculo. Hay que tener en cuenta que la configuración individual no afecta a todos los índices de Biomet:

UTCI no está influenciado por ninguna de estas configuraciones en absoluto porque su implementación se basa en una función de regresión que asume configuraciones racionales para diferentes entornos. PMV / PPD siempre está relacionada con un hombre de 35 años, pero reacciona a los parámetros de la ropa y al metabolismo corporal. PET es el más avanzado de los indicadores implementados y reacciona en todas las configuraciones ajustables aquí (Bruse, 2014).

Figura 43. Pantalla inicial para cálculo de confort en BioMet

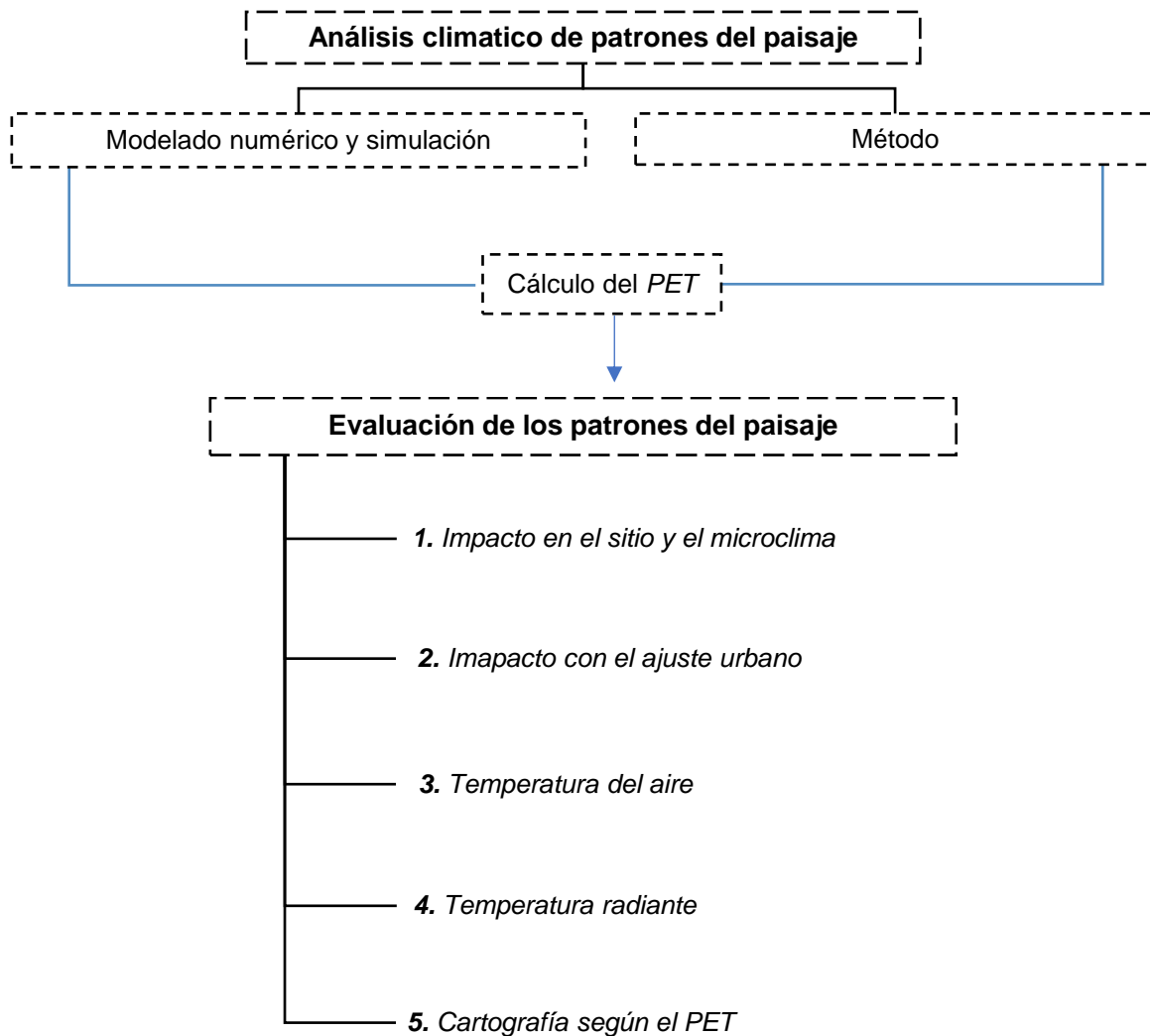


Nota. Imagen extraída de ENVI-met. Referencia de fuente.

3.9. Plan de análisis de resultados

El método a utilizar consta de manipular variables con el fin de comprobar la hipótesis que expresa una relación causal entre ellas. Se utilizarán modelos gráficos para el análisis de datos estadísticos, a través de la utilización de el programa de simulación ENVI-met para generar modelos y mapas térmicos (Figura 44).

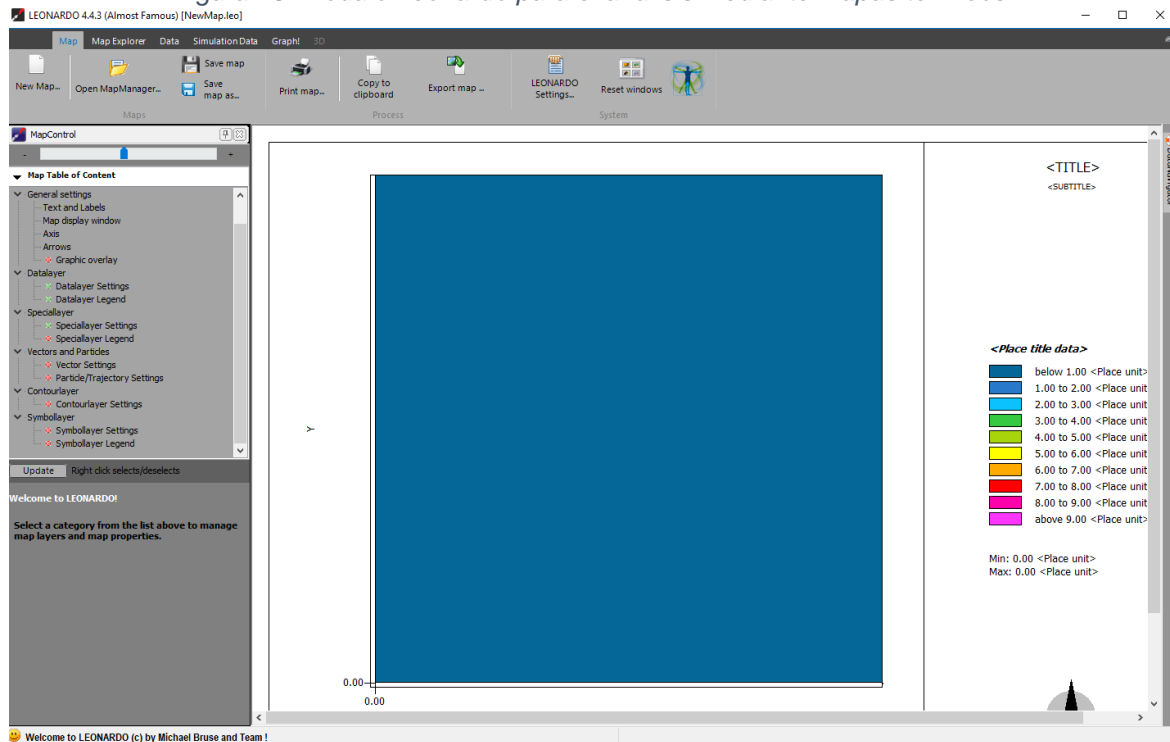
Figura 44. Diagrama general sobre el "Análisis y la Evaluación de los patrones del paisaje"



3.9.1. Confort Térmico

ENVI-met ofrece un análisis proveniente del microclima para cualquier posición dentro del modelo. En el módulo de Leonardo puede ser visualizado y analizado el confort térmico, para el caso de esta investigación mediante el índice PET, permitiendo evaluar los distintos escenarios de simulación y el potencial de enfriamiento de las configuraciones de vegetación (Figura 45).

Figura 45. Módulo Leonardo para el análisis mediante mapas térmicos.



Nota. Imagen extraída de ENVI-met.

CAPÍTULO 4.

RESULTADOS

La sección de resultados del presente estudio, muestra el potencial de enfriamiento en distintos horarios de los escenarios de simulación que fueron modelados en el software ENVI-met, creado por Michael Bruse. Fueron propuestos cinco escenarios, el primero fue un CB o caso base, mostrando la situación actual del área de estudio y cuatro escenarios con distintas configuraciones de árboles *Cupressus Forbessi*, en las aceras. Tales escenarios modificaron el microclima a 1,50 m y afectaron el índice PET en el área residencial Villas del Cedro.

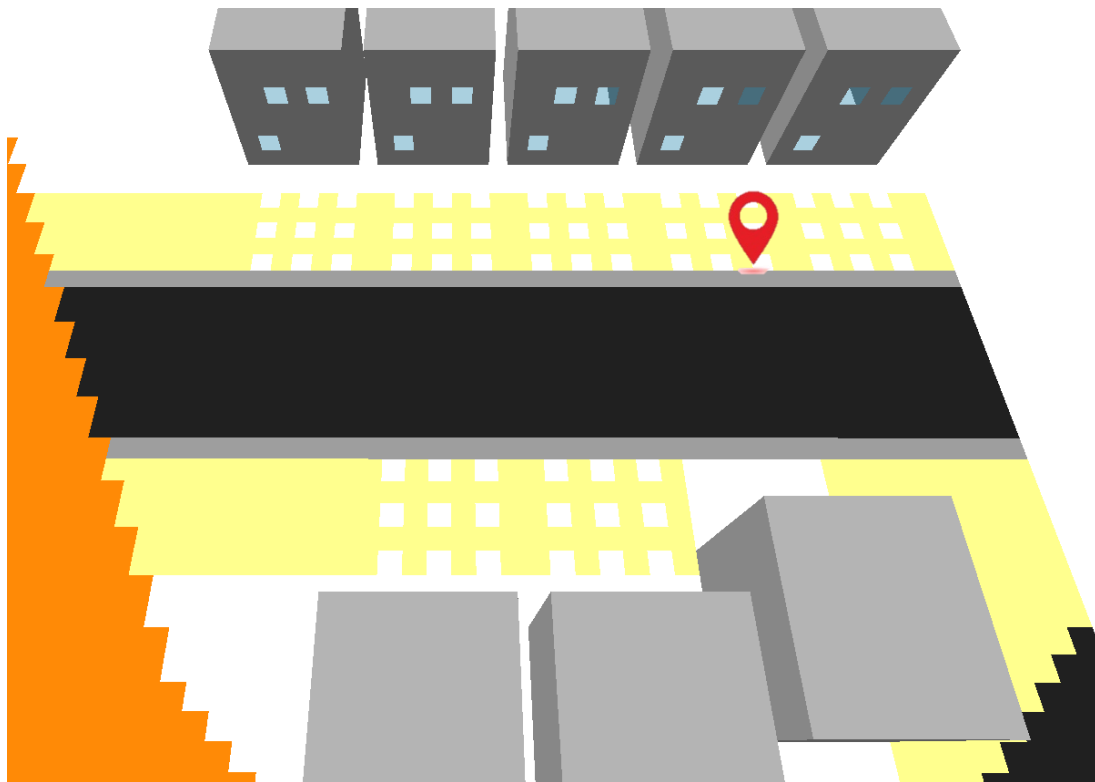


CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. Variaciones del microclima

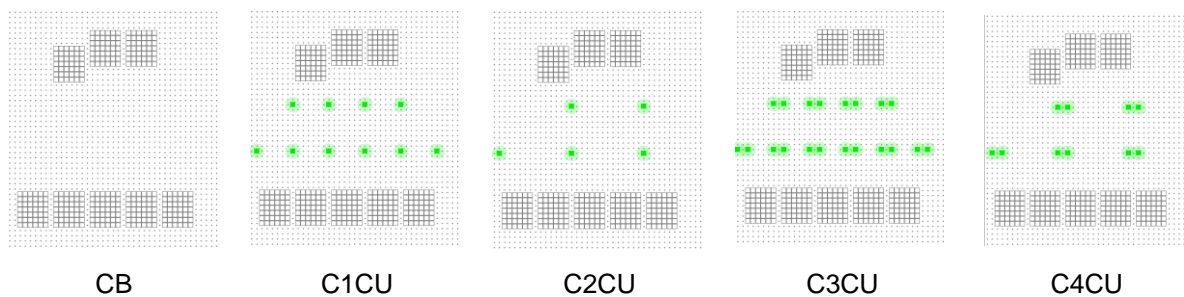
Para comparar cómo las densidades, ubicaciones y arreglos de los árboles influyen en los microclimas exteriores, se seleccionó la calle Sta. Sofía, donde fue realizada la campaña de monitoreo en Villas del Cedro. Para evaluar el confort térmico humano al aire libre, se utilizó el índice PET como indicador para mostrar la sensación térmica. Los cuatro escenarios propuestos más un CB (Figura 46), modelados en el software ENVI-met, fueron sometidos al microclima creado a través de los datos climáticos registrados el día 04 de octubre del 2020. Cada escenario presento una configuración distinta de vegetación con árboles de la especie *Cupressus forbesii*, lo cual modificó en distintos aspectos al microclima del área de estudio, como la Humedad Relativa, la Temperatura del Aire y la Temperatura Media Radiante. Por lo que en el presente análisis se abarcan los datos y hallazgos resultantes a un nivel de 1,5 m. Posteriormente se procedio a simular el CB del día típico.

Figura 46. Ubicación del monitoreo en el modelado del CB en 3D view de Spaces ENVI-met



Como se muestra en la Figura 47, el escenario CB, sirvió para dar diagnóstico de la situación actual del área de estudio, además de determinar los valores utilizados como constantes de estudio, es decir, la geometría urbana, superficies utilizadas, las características de la especie de vegetación y las condiciones climáticas de entrada; los modelos de los escenarios C1CU (con 10 árboles) y C2CU (con 5 árboles) presentaron una configuración con disposición de árboles individuales, a una separación de 7,00 m y 14,00 m respectivamente, entre ellos; mientras que los modelos de los escenarios C3CU (con 20 árboles) y C4CU (con 10 árboles) presentaron una configuración con disposición de dos árboles agrupada, a una separación de 7,00 m y 14,00 m respectivamente, entre ellos.

Figura 47. Escenarios modelados en el software ENVI-met, para analizar el confort térmico a través de configuraciones de vegetación (Imágenes elaboradas a través de módulo Spaces)

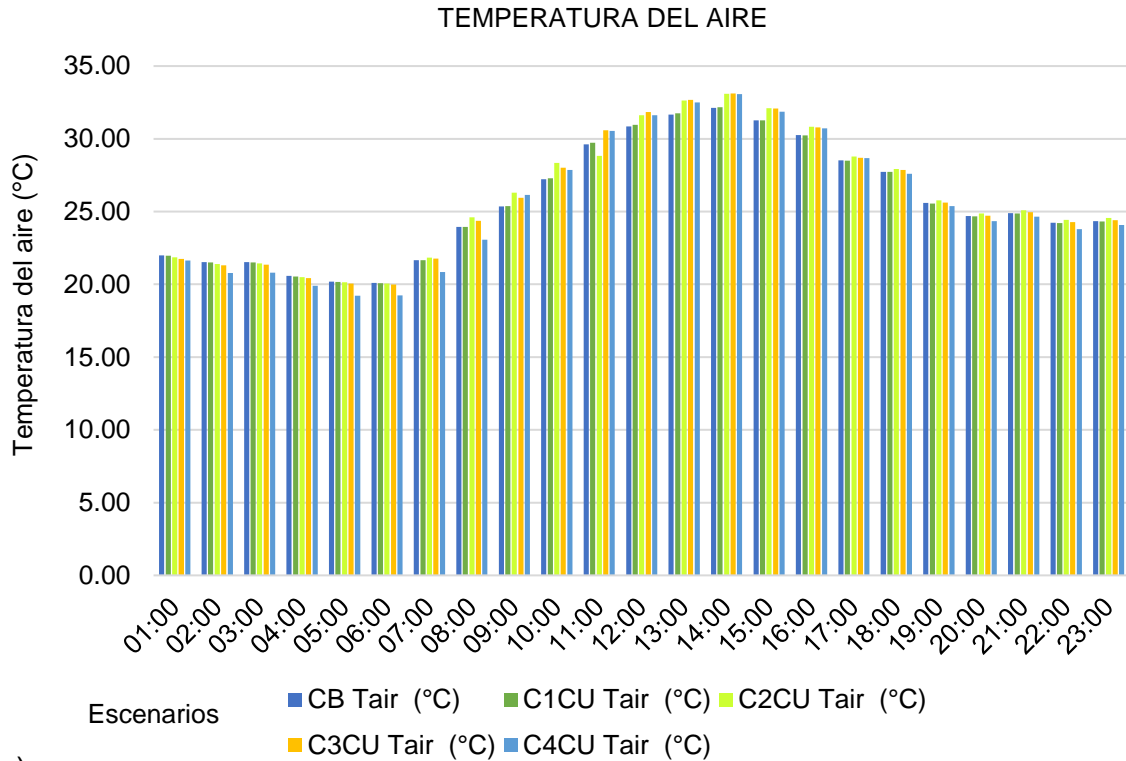


Nota. Imágenes extraídas de ENVI-met.

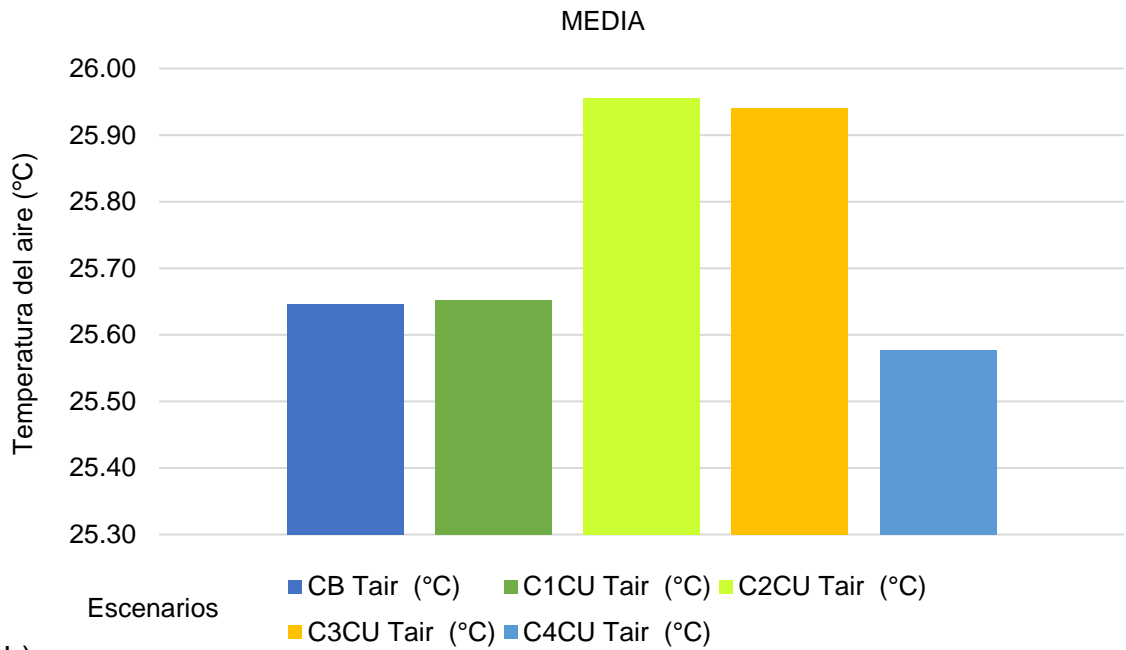
4.1.1. Temperatura del Aire (Tair)

En el escenario CB los valores que muestra la Tair, oscilan entre el 20,09 °C como mínima (a las 06 h 00) y 32,12 °C como máxima (a las 14 h 00), con una media del 25,65 °C; en el escenario C1CU el valor de la mínima es de 20,07 °C (a las 06 h 00) y la máxima de 32,18 °C (a las 14 h 00), mientras la media fue de 25,65 °C; en el escenario C2CU presenta un valor de la mínima de 20,05 °C (a las 06 h 00) y de 33,09 °C como máxima (a las 14 h 00), con una media de 25,96 °C; en el caso C3CU los valores que muestra, oscilan entre 19,98 °C (a las 06 h 00) como mínima y 33,12 °C (a las 14 h 00) como máxima, mientras la media fue de 25,94 °C; en el escenario C4CU el valor de la mínima es de 19,21 °C (a las 05 h 00) y el de la máxima es de 33,07 °C (a las 14 h 00), con una media de 25,58 °C (Figura 48).

Figura 48. a) Análisis de comparación de la Temperatura del aire registrada en la simulación a distintas horas, b) Análisis de comparación de medias de temperatura del aire



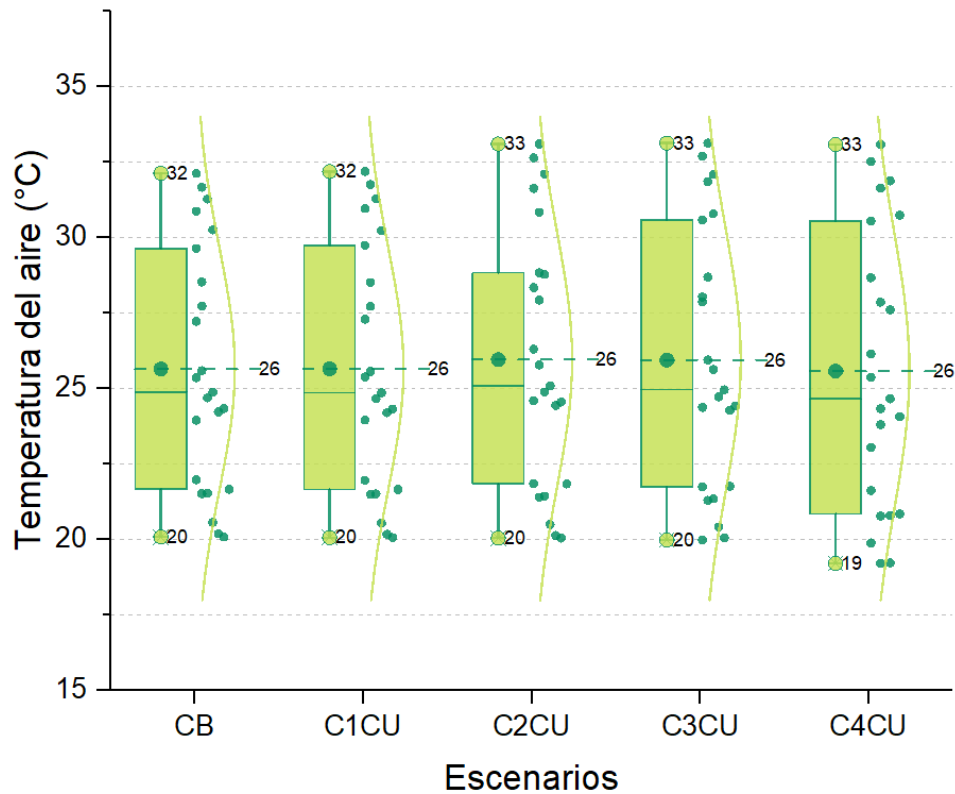
a)



b)

En la Figura 49, se muestran diagramas de caja (boxplots) de comparación de la temperatura del aire a 1,5 m en los diferentes escenarios de simulación. Los límites superior e inferior de los diagramas de caja indican los percentiles en sus límites inferior por el Q1 (Perc 25) y Q3 (Perc 25), los puntos verdes dentro de las barras muestran el valor medio y los puntos que sobresalen a los extremos de las barras muestran el valor mínimo en la parte inferior y el máximo en la parte superior. El perfil de dispersión de los datos que están al costado de las cajas es una curva de distribución normal.

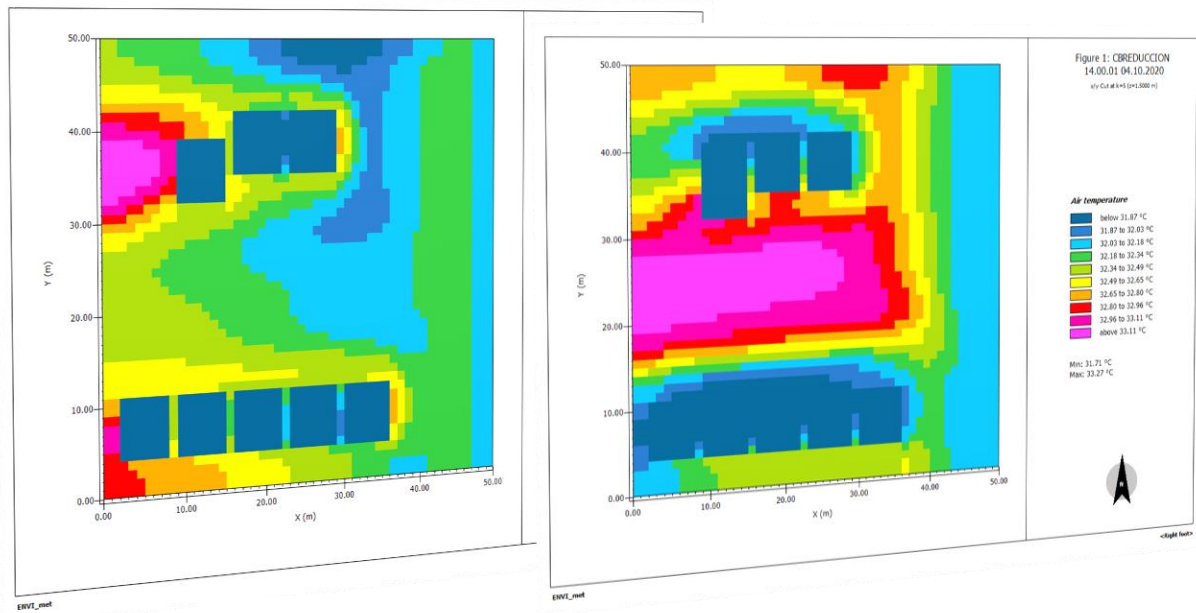
Figura 49. Gráfico boxplot de la temperatura del aire en los escenarios de simulación



A continuación, se muestran los diagramas de temperatura del aire obtenidos a través de la simulación realizada con el software ENVI-met v4.4.3 para los escenarios de modelación, el CB, C1CU, C2CU, C3CU y C4CU para las horas relevantes de este estudio, que toman como referencia la horas que presenta un valor mayor y un valor menor de ° C en la temperatura del aire (06 h 00 y 14 h 00).

Como muestra la Figura 50, en el CB a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 19,85 °C y máximo de 20,50 °C, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 31,71 °C y el máximo de 33,27 °C (para consultar los datos climáticos ver Apéndice C).

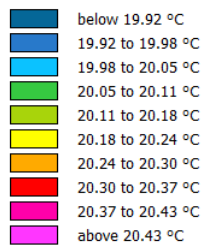
Figura 50. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura del Aire a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario CB a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

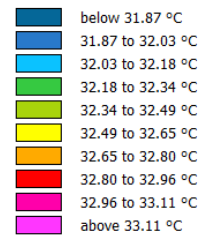
15 h 00

Air temperature



Min: 19.85 °C
Max: 20.50 °C

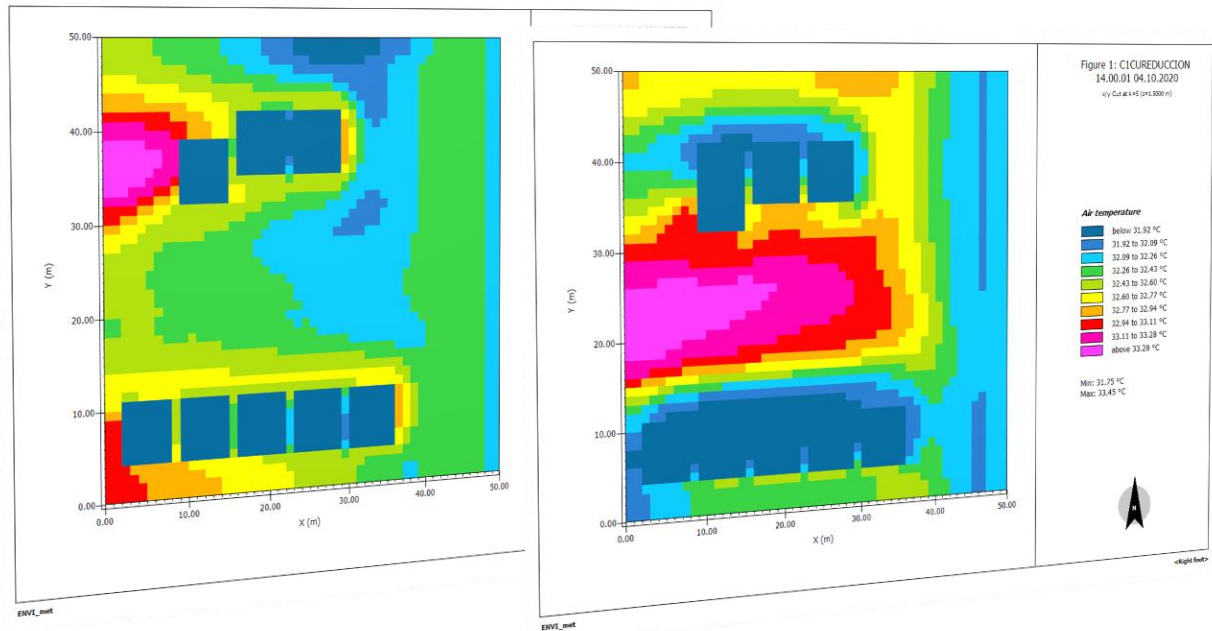
Air temperature



Min: 31.71 °C
Max: 33.27 °C

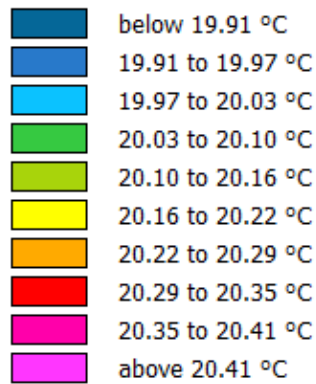
Como se muestra en la Figura 51, en el C1CU, a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 19,84 °C y máximo de 20,48 °C, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 31,75 °C y el máximo de 33,45 °C.

Figura 51. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura del Aire a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C1CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

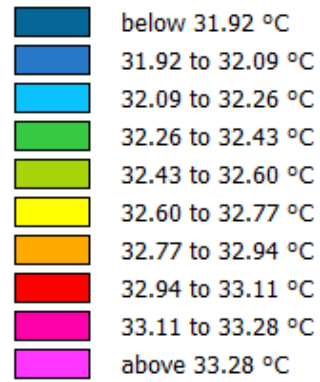
Air temperature



Min: 19.84 °C
Max: 20.48 °C

14 h 00

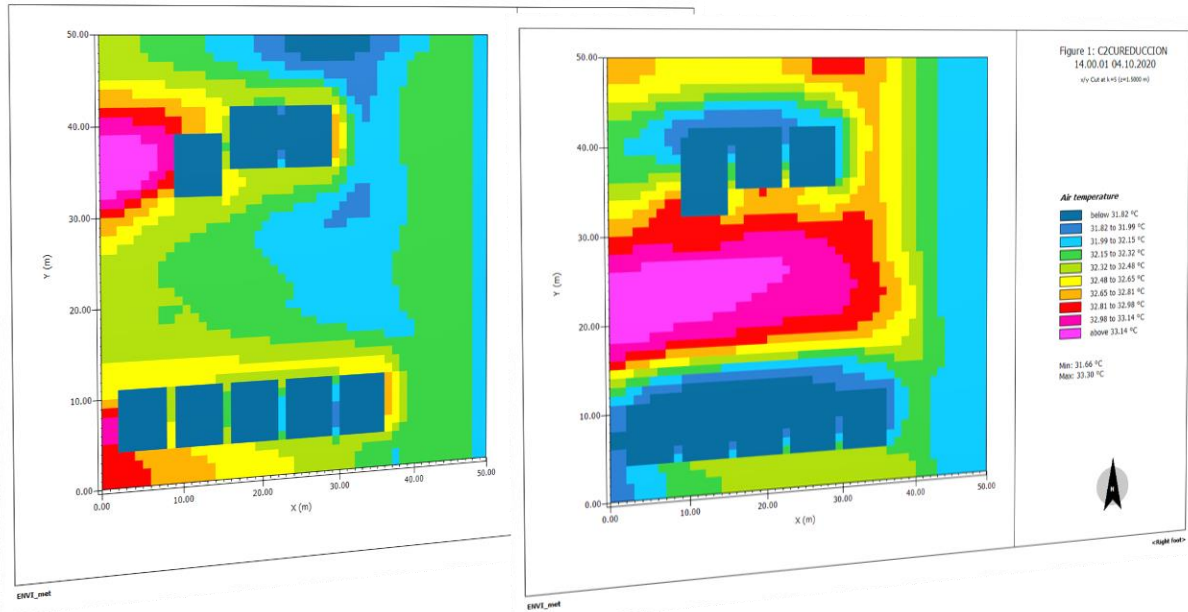
Air temperature



Min: 31.75 °C
Max: 33.45 °C

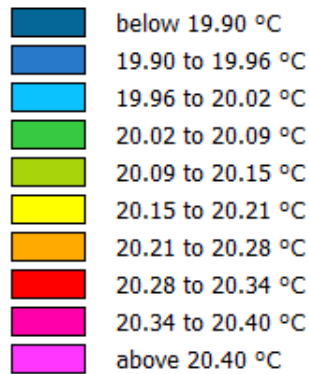
Como se muestra en la Figura 52, en el C2CU, a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 19,83 °C y máximo de 20,47 °C, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 31,66 °C y el máximo de 33,30 °C.

Figura 52. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura del Aire a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C2CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

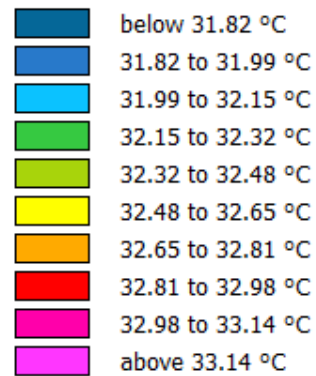
Air temperature



Min: 19.83 °C
Max: 20.47 °C

14 h 00

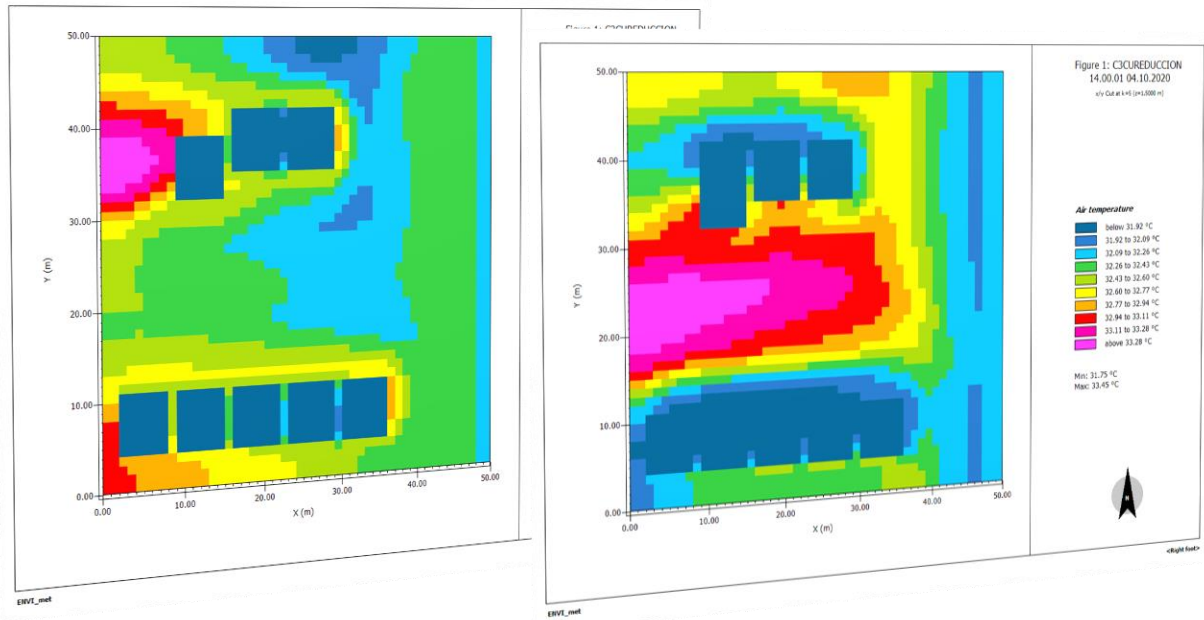
Air temperature



Min: 31.66 °C
Max: 33.30 °C

Como se muestra en la Figura 53, en el C1CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 19,84 °C y máximo de 20,48 °C, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 31,75 °C y el máximo de 33,45 °C.

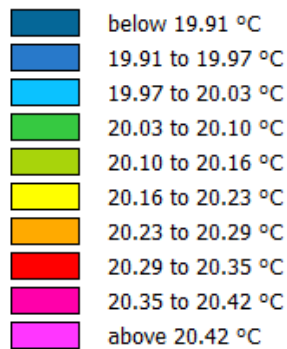
Figura 53. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura del Aire a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C3CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

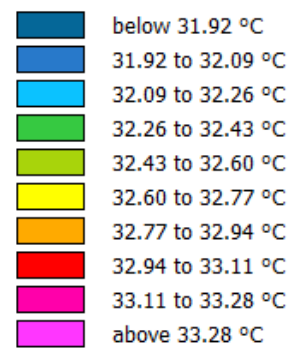
14 h 00

Air temperature



Min: 19.84 °C
Max: 20.48 °C

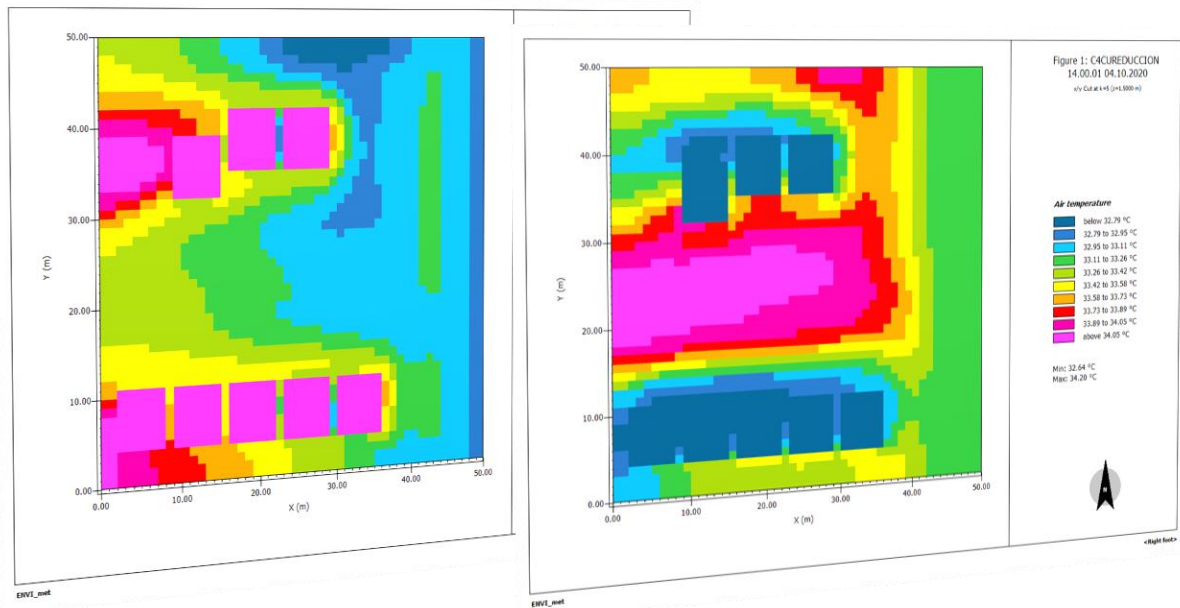
Air temperature



Min: 31.75 °C
Max: 33.45 °C

Como se muestra en la Figura 54, en el C4CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 18,74 °C y máximo de 19,47 °C, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 32,64 °C y el máximo de 34,20 °C.

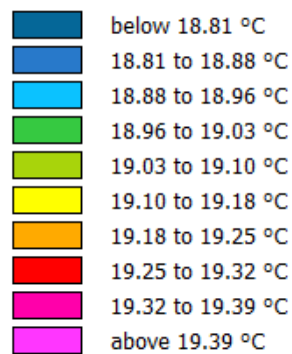
Figura 54. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura del Aire a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C4CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

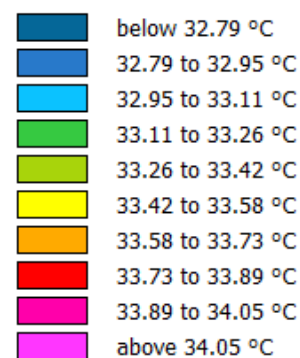
14 h 00

Air temperature



Min: 18.74 °C
Max: 19.47 °C

Air temperature



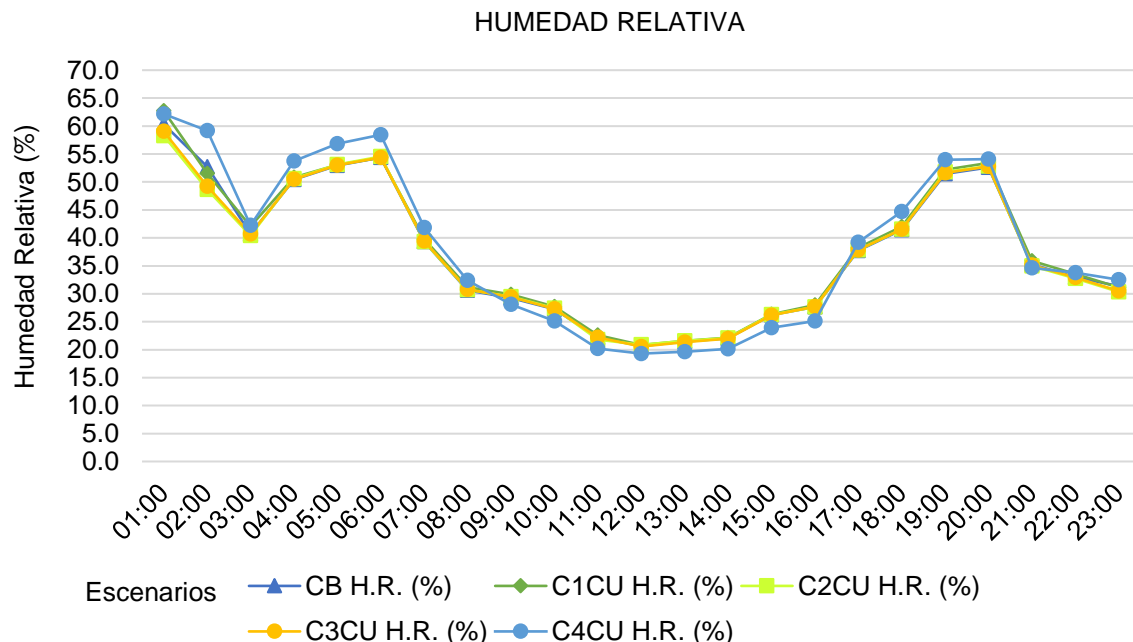
Min: 32.64 °C
Max: 34.20 °C

4.1.2. Humedad Relativa (H.R.)

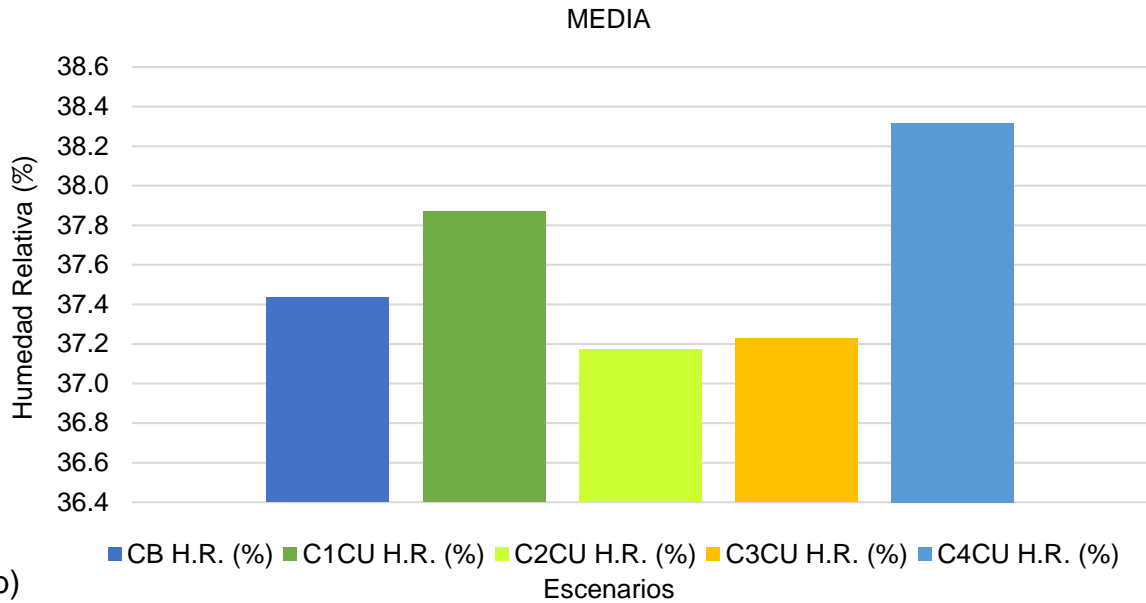
En esta sección, se describen los datos analizados en los distintos escenarios a través de la variable H.R., en un período entre la 01 h 00 hasta las 23 h 00 del día 04 de octubre del 2020. Cabe resaltar que el valor de la máxima en todos los casos se presenta a la 01 h 00 y el de la mínima a las 12 h 00.

Con base en los datos climáticos arrojados en la simulación del escenario CB, los valores que presenta de H.R., oscilan entre el 20,65 % y el 60,34 %, con una media del 37,44 %. Al introducir vegetación, en el escenario C1CU se percibe un aumento de la H.R., oscilando entre el 20,84 % y el 62,72 % (el valor de máxima más alto entre escenarios), con una media del 37,87 %. Para el caso C2CU, el valor mínimo es 20,87 % (el valor de mínima más alto entre escenarios) y el máximo de 58,29 %, con una media de 37,17 %. El caso C3CU maneja un porcentaje de H.R. entre el 20,56 % y el 59,06 % (el valor con menor porcentaje de máxima), con una media de 37,23 %. Por último, en el escenario C4CU se muestra un porcentaje mínimo del 19,30 % (el valor con menor porcentaje de mínima) y el máximo de 62,16 %, con una media de 38,32 % (Figura 55) (para consultar los datos climáticos ver Apéndice C).

Figura 55. a) Análisis de comparación de la Humedad Relativa registrada en la simulación a distintas horas, b) Análisis de comparación de la media de H.R.

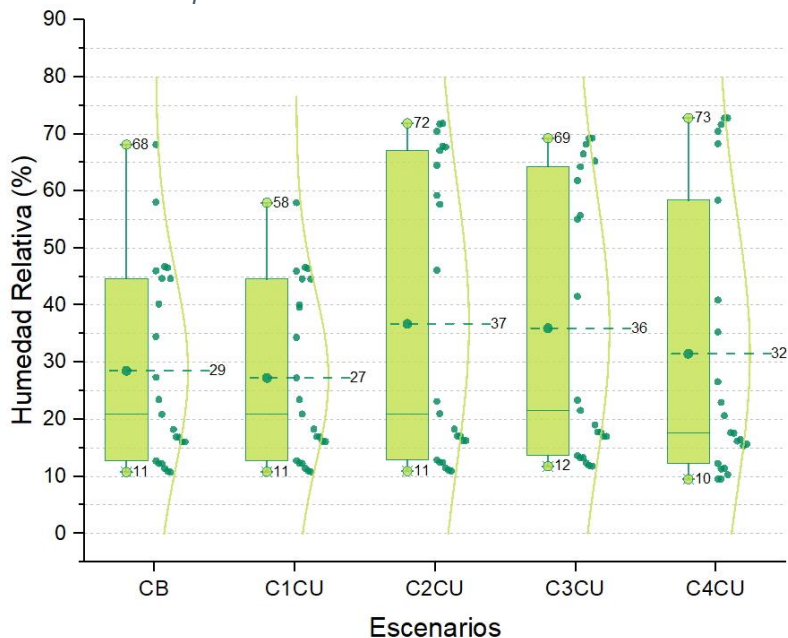


a)



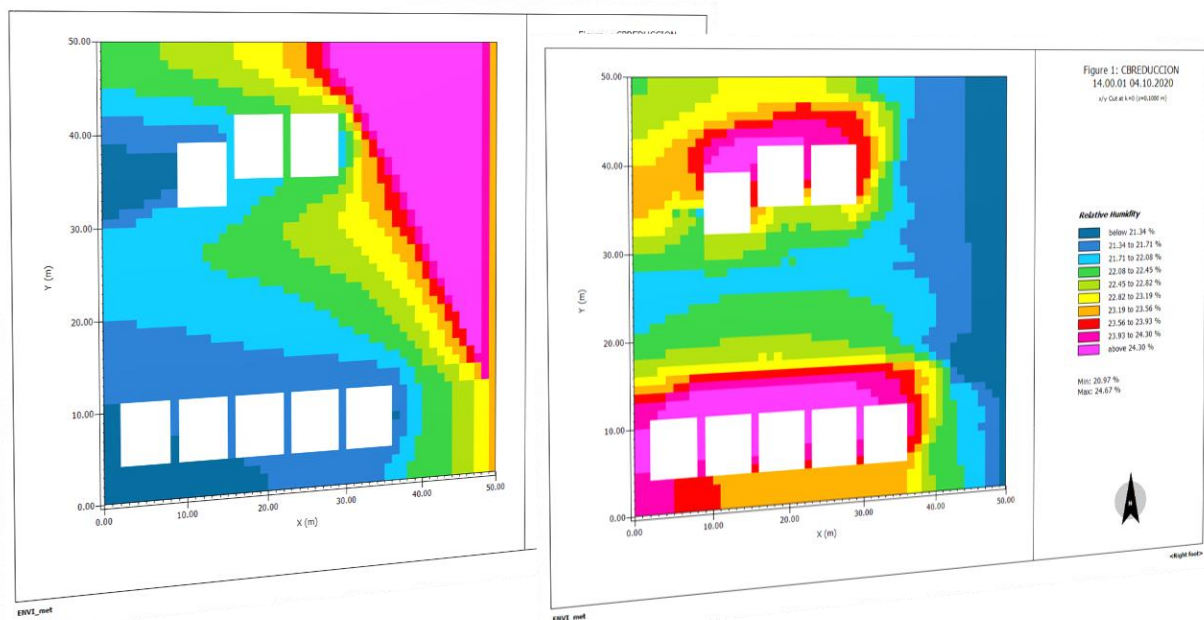
En la Figura 56, se muestran los boxplot de comparación de la H.R. a 1,5 m en los diferentes escenarios de simulación. Los límites superior e inferior de los diagramas de caja indican los percentiles en sus límites inferior por el Q1 (Perc 25) y Q3 (Perc 75), los puntos verdes dentro de las barras muestran el valor medio y los puntos que sobresalen a los extremos de las barras muestran el valor mínimo en la parte inferior y el máximo en la parte superior. El perfil de dispersión de los datos que están al costado de las cajas es una curva de distribución normal.

Figura 56. Gráfico boxplot de la Humedad Relativa en los escenarios de simulación



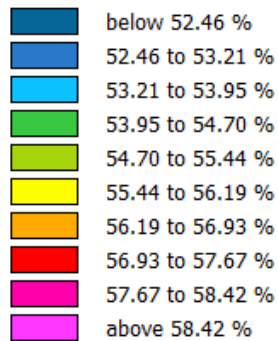
A continuación, se muestran los diagramas de H.R. obtenidos a través de la simulación realizada con el software ENVI-met v4.4.3 para los escenarios de modelación, el CB, C1CU, C2CU, C3CU y C4CU para las horas relevantes de este estudio (06 h 00 y 14 h 00). Como se muestra en la Figura 57, en el CB a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 51,72 % y máximo de 59,16 %, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 20,97 % y el máximo de 24,67 %.

Figura 57. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Humedad Relativa a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario CB, simulado en ENVI-met



06 h 00

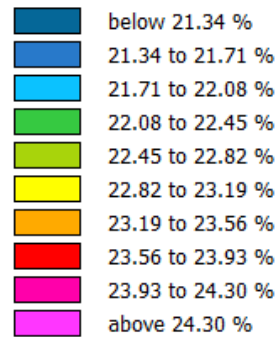
Relative Humidity



Min: 51.72 %
Max: 59.16 %

14 h 00

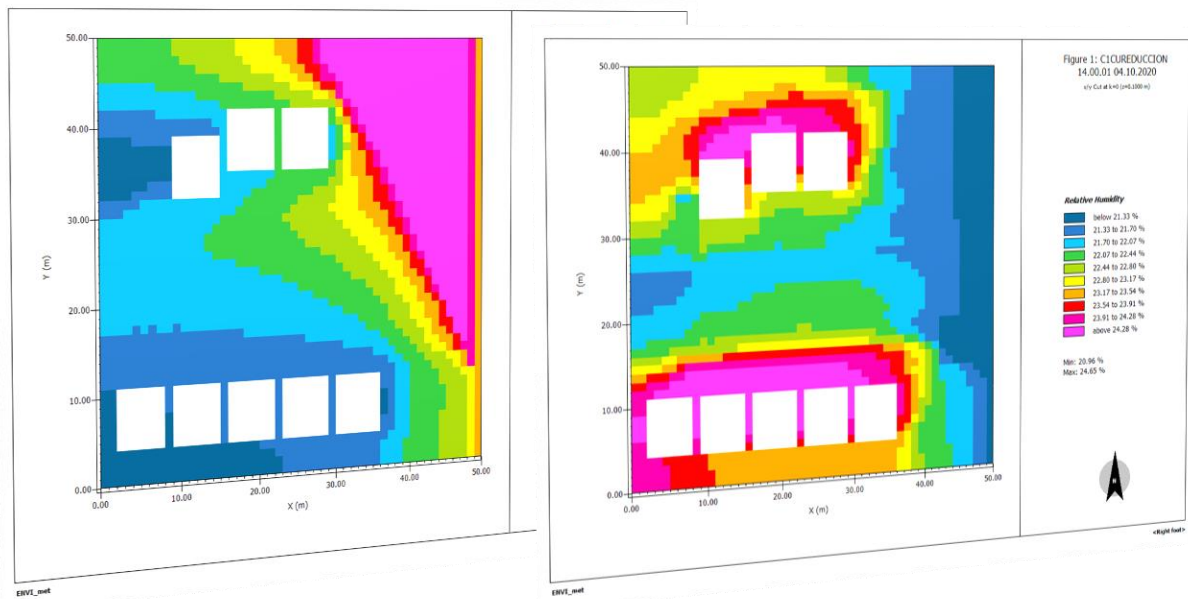
Relative Humidity



Min: 20.97 %
Max: 24.67 %

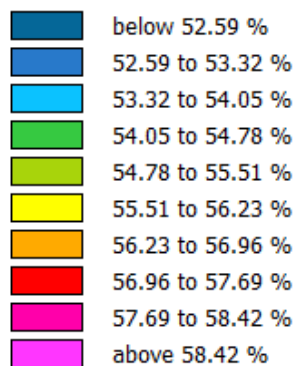
Como se muestra en la Figura 58, en el C1CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 51,86 % y máximo de 59,15 %, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 20,96 % y el máximo de 24,65 %.

Figura 58. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Humedad Relativa a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C1CU, simulado en ENVI-met



06 h 00

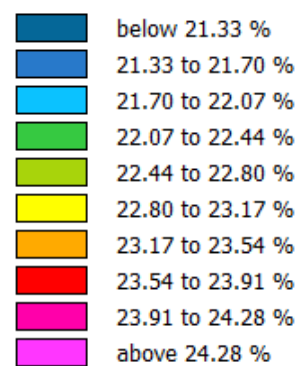
Relative Humidity



Min: 51.86 %
Max: 59.15 %

14 h 00

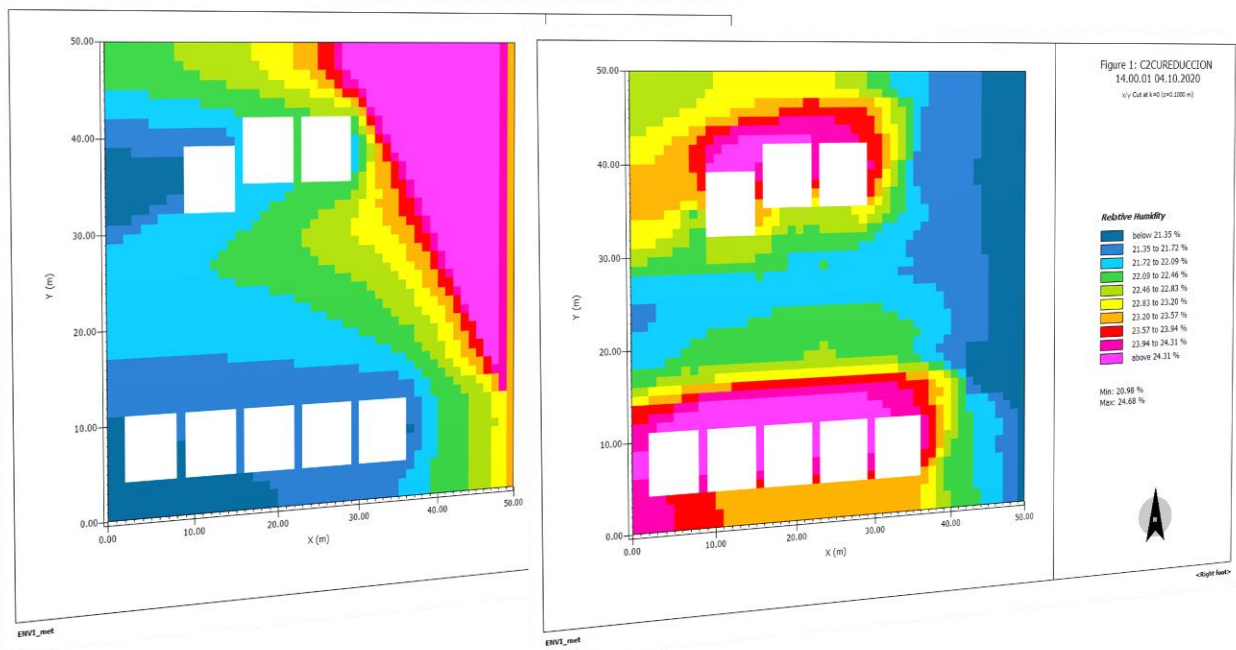
Relative Humidity



Min: 20.96 %
Max: 24.65 %

Como se muestra en la Figura 59, en el C2CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 51,77 % y máximo de 59,19 %, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 20,98 % y el máximo de 24,68 %.

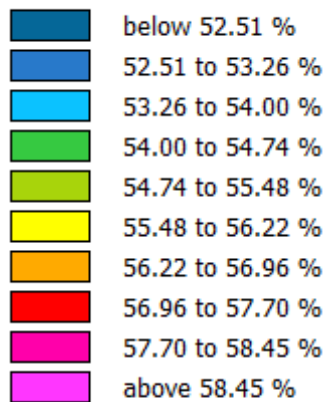
Figura 59. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Humedad Relativa a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C2CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

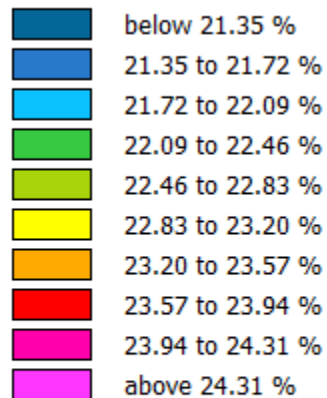
14 h 00

Relative Humidity



Min: 51.77 %
Max: 59.19 %

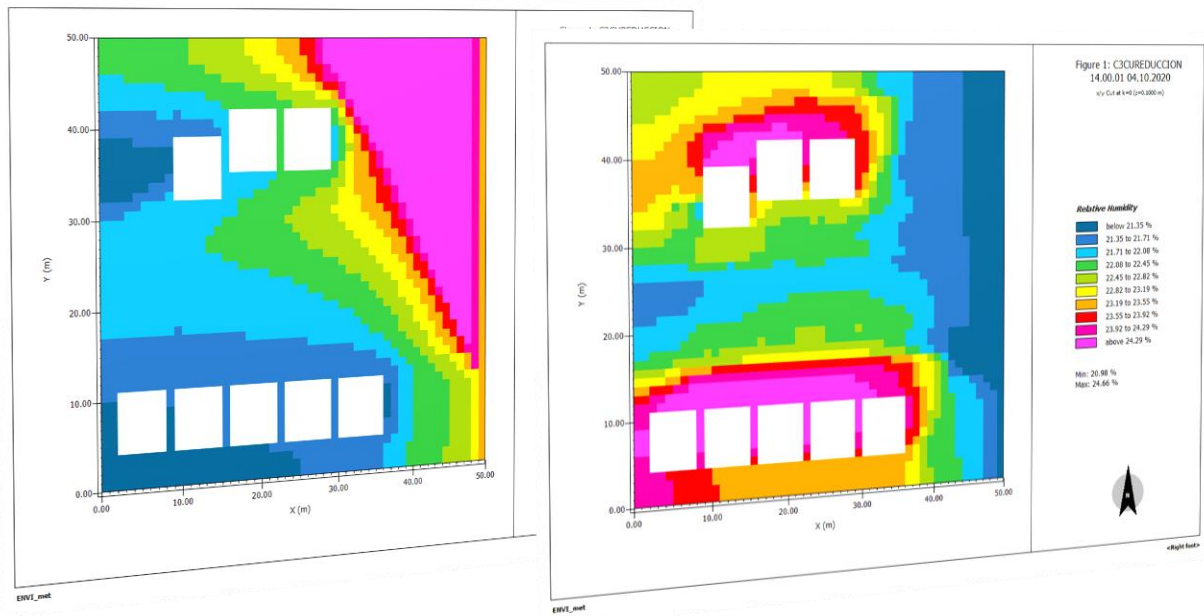
Relative Humidity



Min: 20.98 %
Max: 24.68 %

Como se muestra en la Figura 60, en el C3CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 51,90 % y máximo de 59,08 %, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 20,98 % y el máximo de 24,66 %.

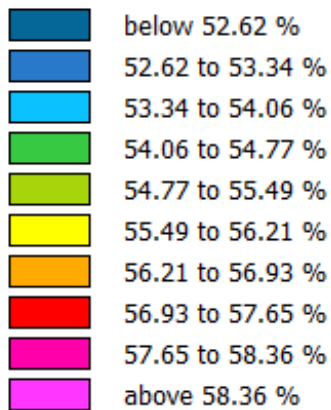
Figura 60. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Humedad Relativa a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C3CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

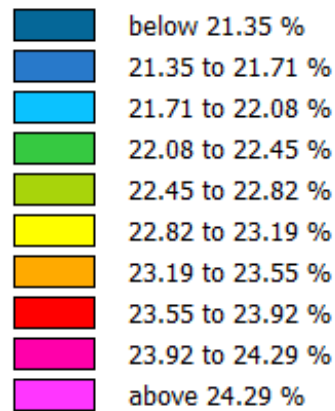
14 h 00

Relative Humidity



Min: 51.90 %
Max: 59.08 %

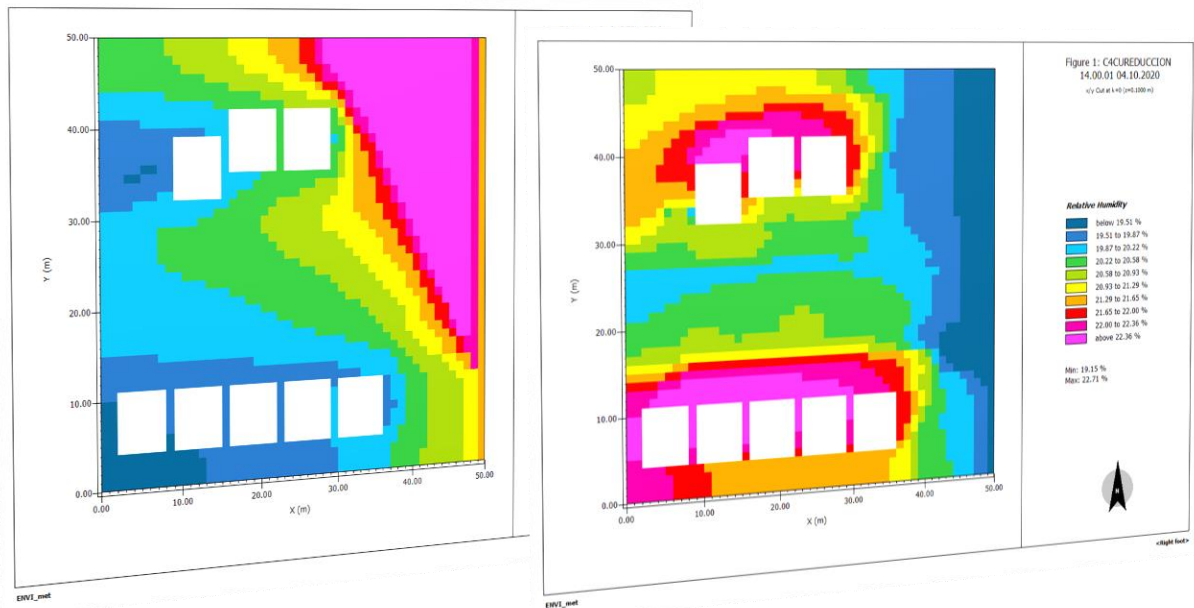
Relative Humidity



Min: 20.98 %
Max: 24.66 %

Como se muestra en la Figura 61, en el C1CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 55,03 % y máximo de 63,36 %, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 19,15 % y el máximo de 22,71 %.

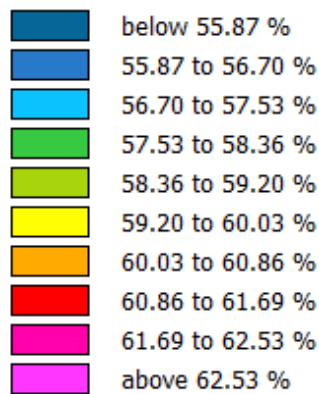
Figura 61. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Humedad Relativa a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C4CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

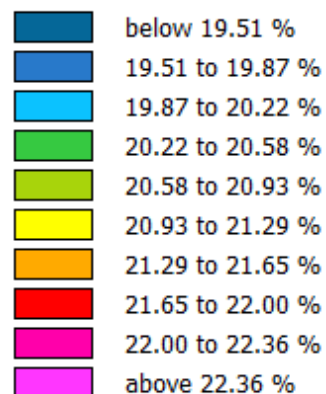
14 h 00

Relative Humidity



Min: 55.03 %
Max: 63.36 %

Relative Humidity



Min: 19.15 %
Max: 22.71 %

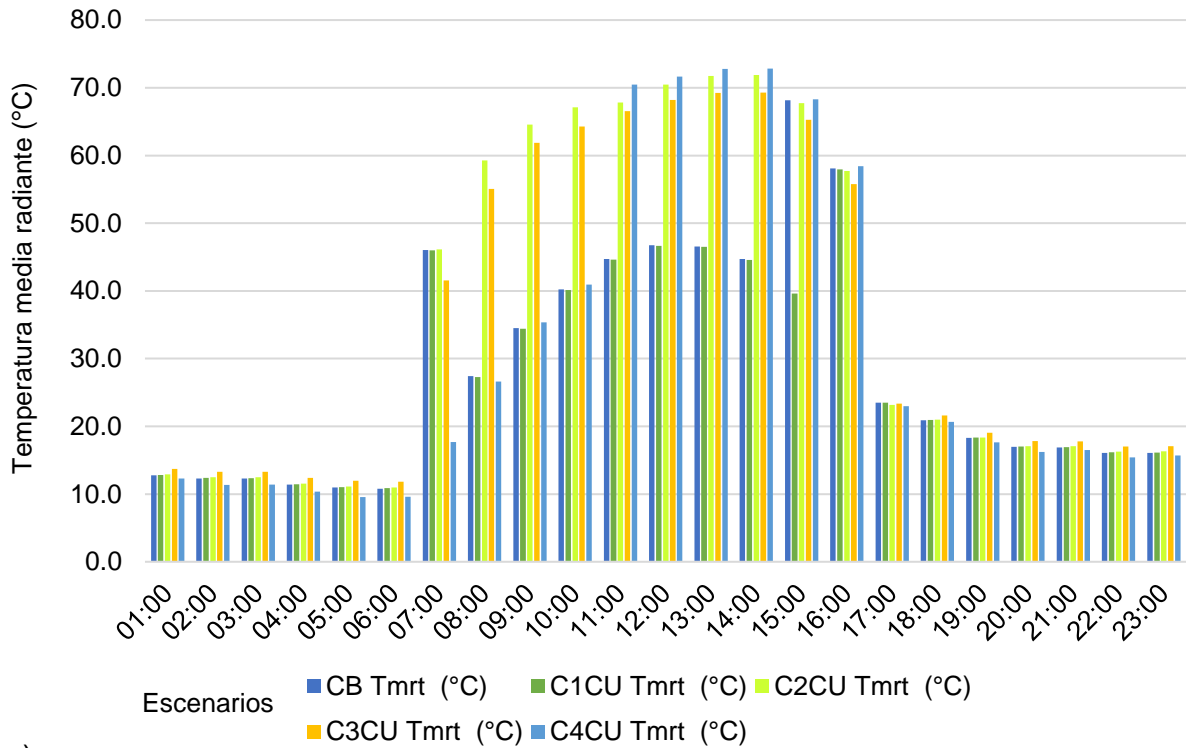
4.1.1. Temperatura Media Radiante (Tmrt)

En el escenario "CB", los valores que presenta la Tmrt, oscilan entre el 10,80 °C como mínima (a las 06 h 00) y 68,14 °C como máxima (a las 15 h 00), con una media del 28,54 °C; en el escenario C1CU el valor de la mínima es de 10,86 °C (a las 06 h 00) y la máxima de 57,97 °C (a las 16 h 00), mientras la media fue de 27,29 °C; en el escenario C2CU presenta un valor de la mínima de 10,96 °C (a las 06 h 00) y de 71,87 °C como máxima (a las 14 h 00), con una media de 36,75 °C; en el caso C3CU los valores que muestra, oscilan entre los 11,82 °C (a las 06 h 00) como mínima y 69,29 °C (a las 14 h 00) como máxima, mientras la media fue de 35,97 °C; en el escenario C4CU el valor de la mínima es de 9,56 °C (a las 05 h 00) y el la máxima es de 72,82 °C (a las 14 h 00), con una media de 31,51 °C (

Figura 62 62) (para consultar los datos de temperatura media radiante **ver Apendice C**).

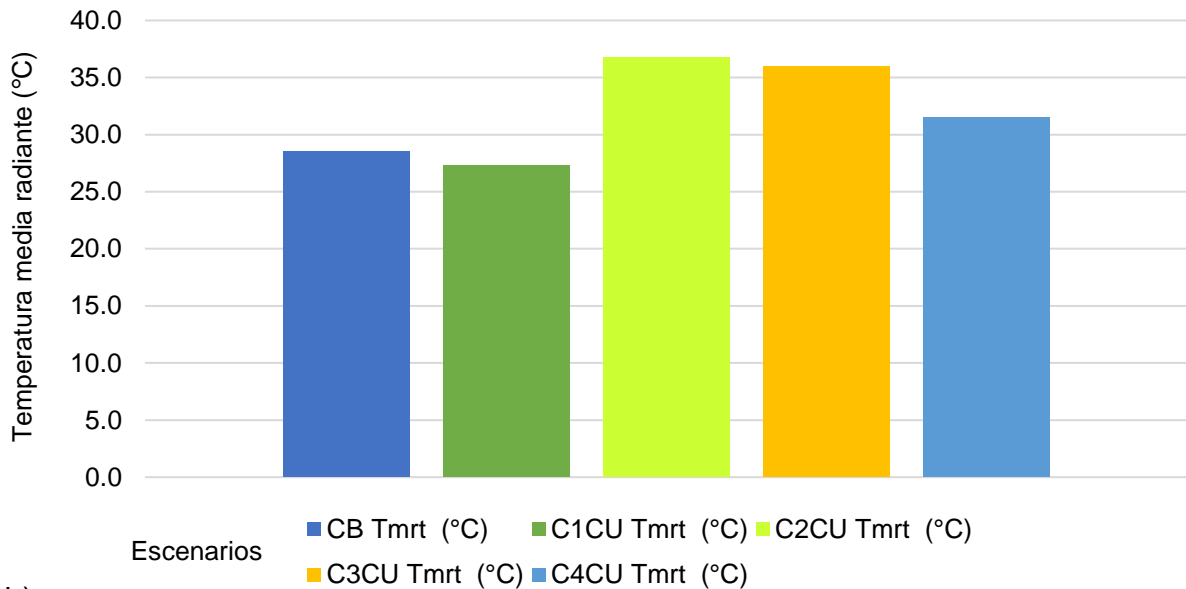
Figura 62. a) Análisis de comparación de la Temperatura Media Radiante registrada en la simulación a distintas horas, b) Análisis de comparación de medias de Temperatura Media Radiante.

TEMPERATURA MEDIA RADIANTE



a)

MEDIA

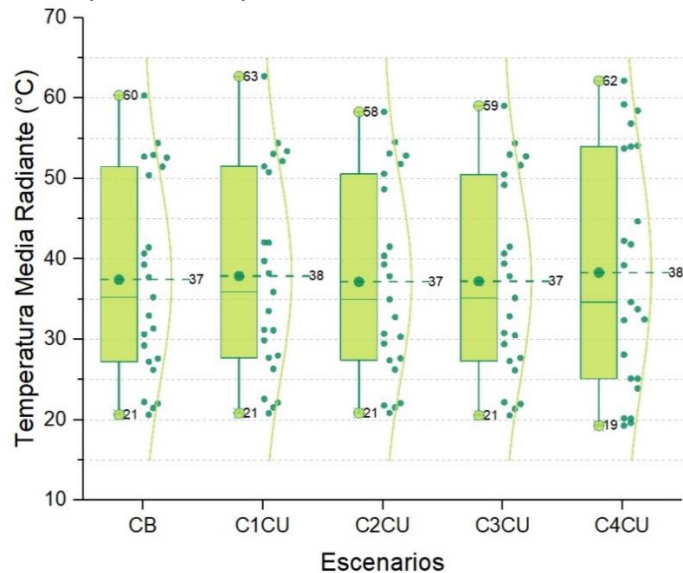


b)

En la Figura 63 se muestra la comparación de la Tmrt a 1,5 m en los diferentes escenarios de simulación. Los límites superior e inferior de los diagramas de caja indican los percentiles en sus límites inferior por el Q1 (Perc 25) y Q3 (Perc 25), los

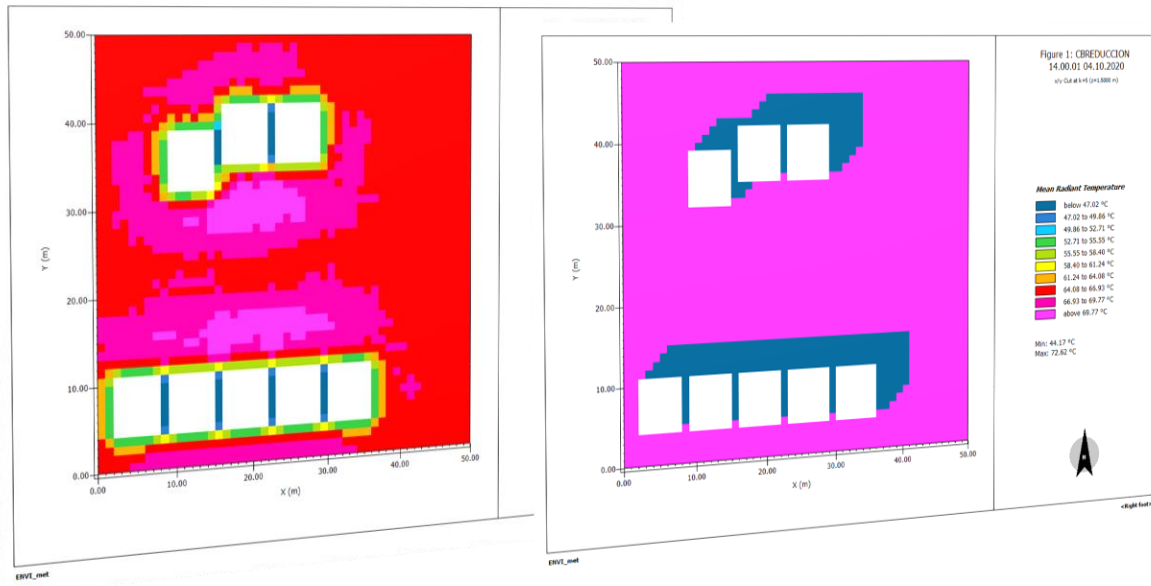
puntos verdes dentro de las barras muestran el valor medio y los puntos que sobresalen a los extremos de las barras muestran el valor mínimo en la parte inferior y el máximo en la parte superior. El perfil de dispersión de los datos que están al costado de las cajas es una curva de distribución normal.

Figura 63. Gráfico boxplot de la Temperatura Media Radiante en los escenarios de simulación



A continuación, se muestran los diagramas de Tmrt obtenidos a través de la simulación realizada con el software ENVI-met v4.4.3 para los escenarios de modelación, el CB, C1CU, C2CU, C3CU y C4CU para las horas relevantes de este estudio, que toman como referencia la horas que presenta un valor mayor y un valor menor de °C (06 h 00 y 14 h 00). Como se muestra en la Figura 64, en el CB a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 9,83 °C y máximo de 11,06 °C, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 44,17 °C y el máximo de 72,62 °C.

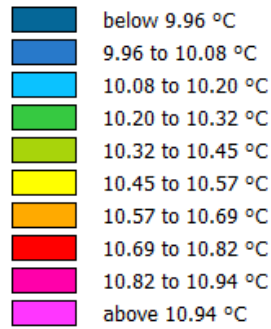
Figura 64. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura Media Radiante a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario CB a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

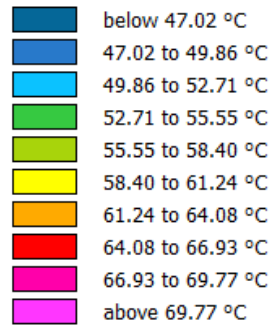
14 h 00

Mean Radiant Temperature



Min: 9.83 °C
Max: 11.06 °C

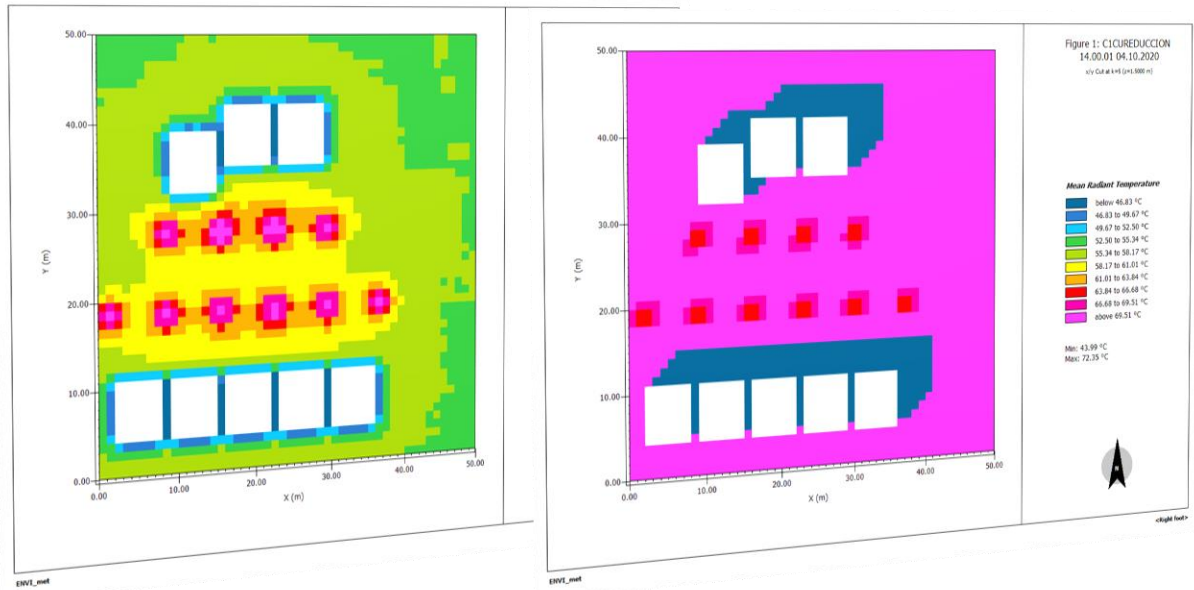
Mean Radiant Temperature



Min: 44.17 °C
Max: 72.62 °C

Como se muestra en la Figura 65, en el C1CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 9,87 °C y máximo de 12,11 °C, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 43,99 °C y el máximo de 72,35 °C.

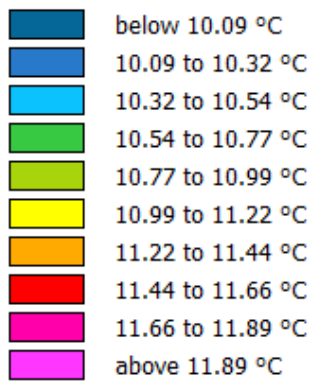
Figura 65. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura Media Radiante a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C1CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

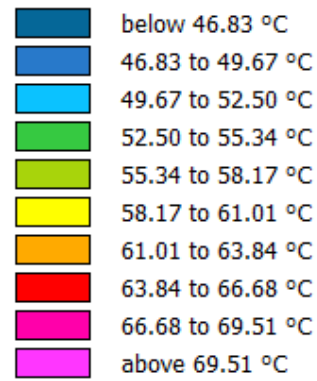
14 h 00

Mean Radiant Temperature



Min: 9.87 °C
Max: 12.11 °C

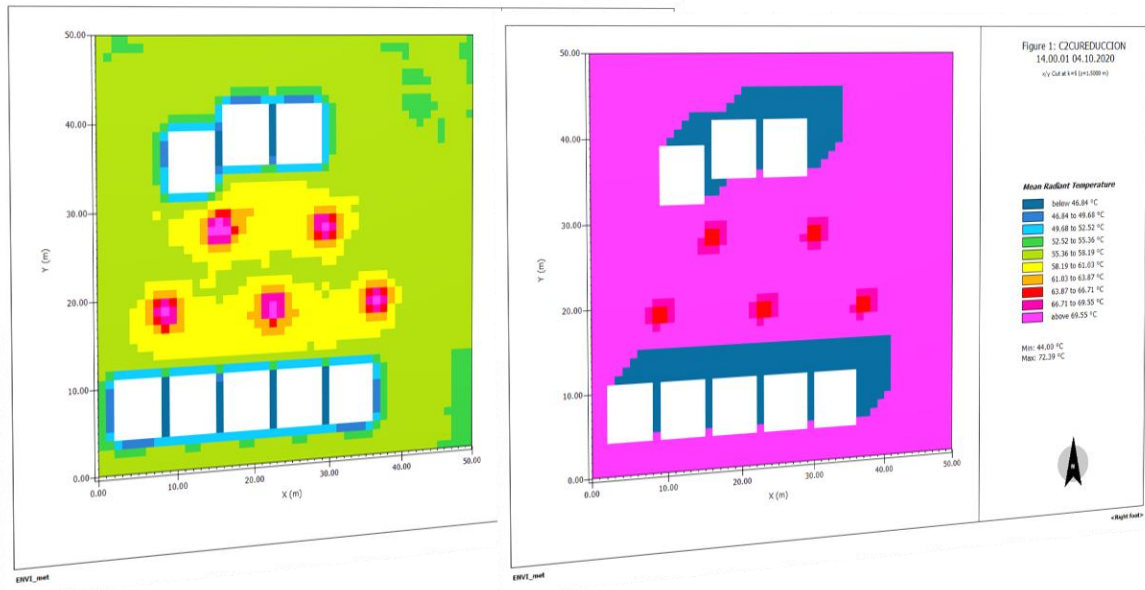
Mean Radiant Temperature



Min: 43.99 °C
Max: 72.35 °C

Como se muestra en la Figura 66, en el C2CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 9,84 °C y máximo de 12,05 °C, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 44,00 °C y el máximo de 72,39 °C.

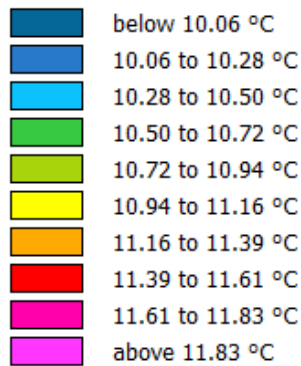
Figura 66. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura Media Radiante a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C2CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

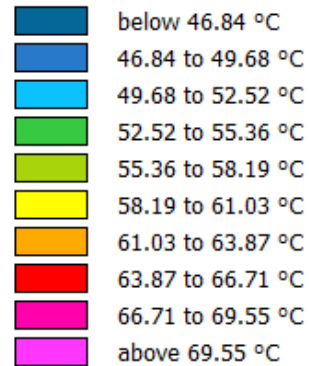
14 h 00

Mean Radiant Temperature



Min: 9.84 °C
Max: 12.05 °C

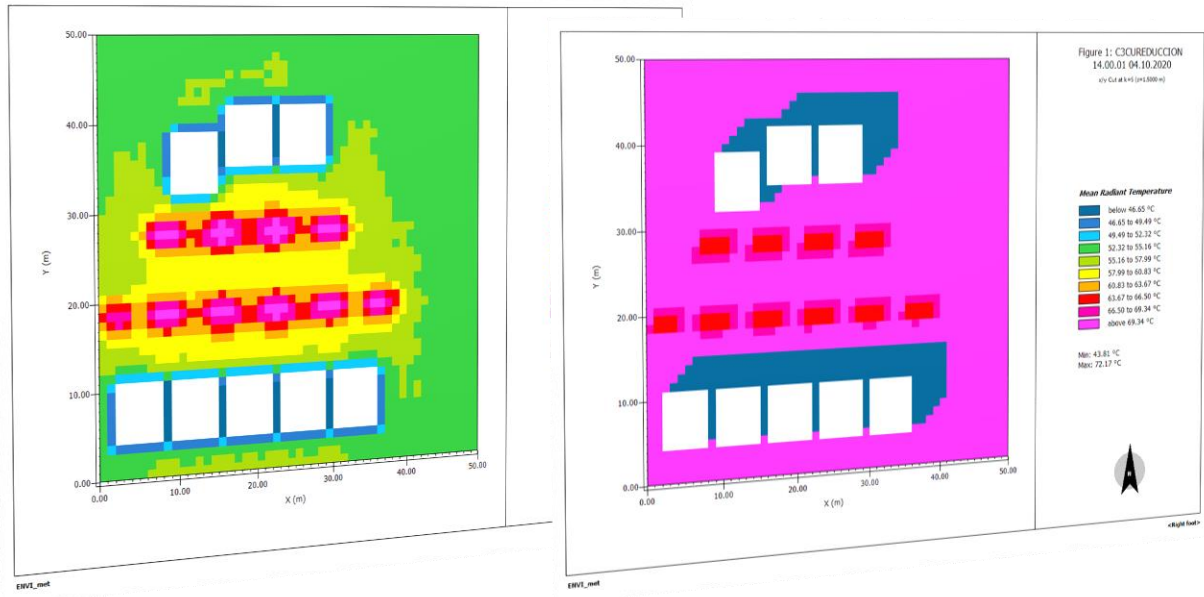
Mean Radiant Temperature



Min: 44.00 °C
Max: 72.39 °C

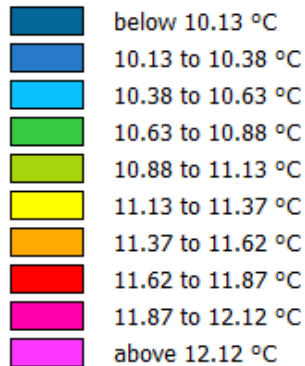
Como se muestra en la Figura 67, en el C3CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 9,89 °C y máximo de 12,37 °C, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 43,81 °C y el máximo de 72,17 °C.

Figura 67. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura Media Radiante a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C3CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

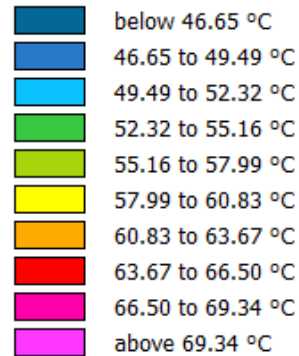
Mean Radiant Temperature



Min: 9.89 °C
Max: 12.37 °C

14 h 00

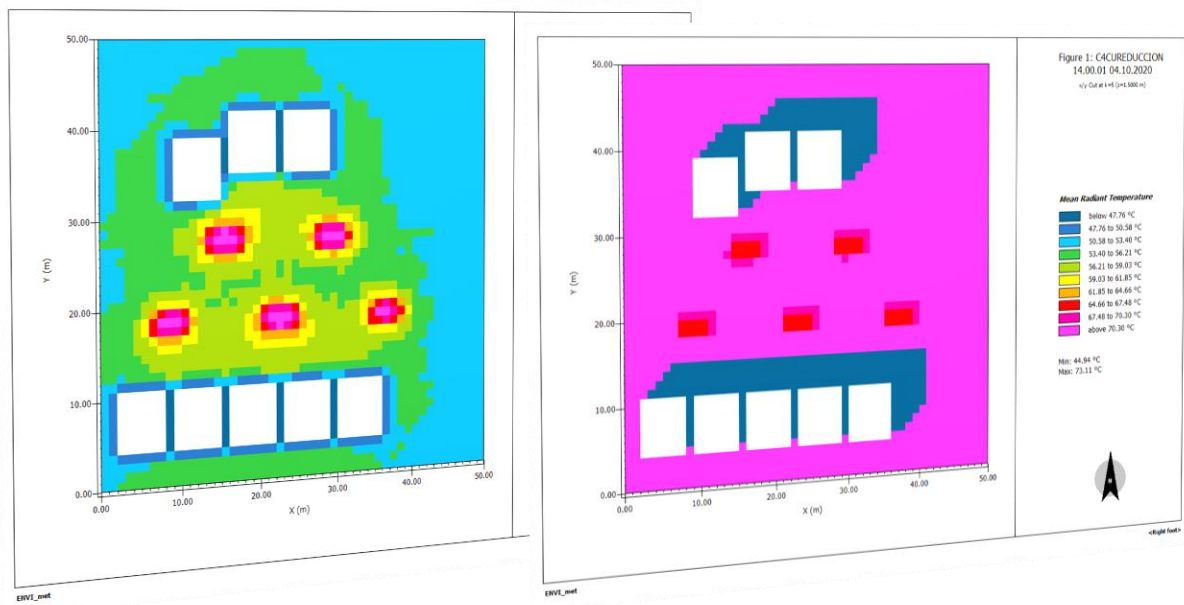
Mean Radiant Temperature



Min: 43.81 °C
Max: 72.17 °C

Como se muestra en la Figura 68, en el C4CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 8,95 °C y máximo de 11,13 °C, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 44,94 °C y el máximo de 73,11 °C.

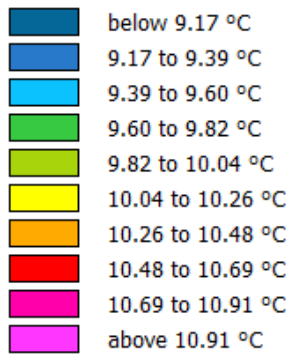
Figura 68. Mapas térmicos del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Temperatura Media Radiante a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C4CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

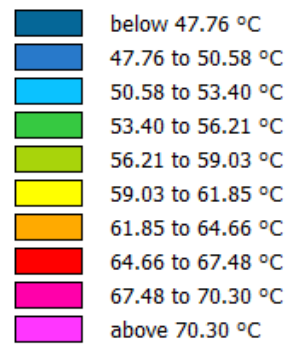
14 h 00

Mean Radiant Temperature



Min: 8.95 °C
Max: 11.13 °C

Mean Radiant Temperature



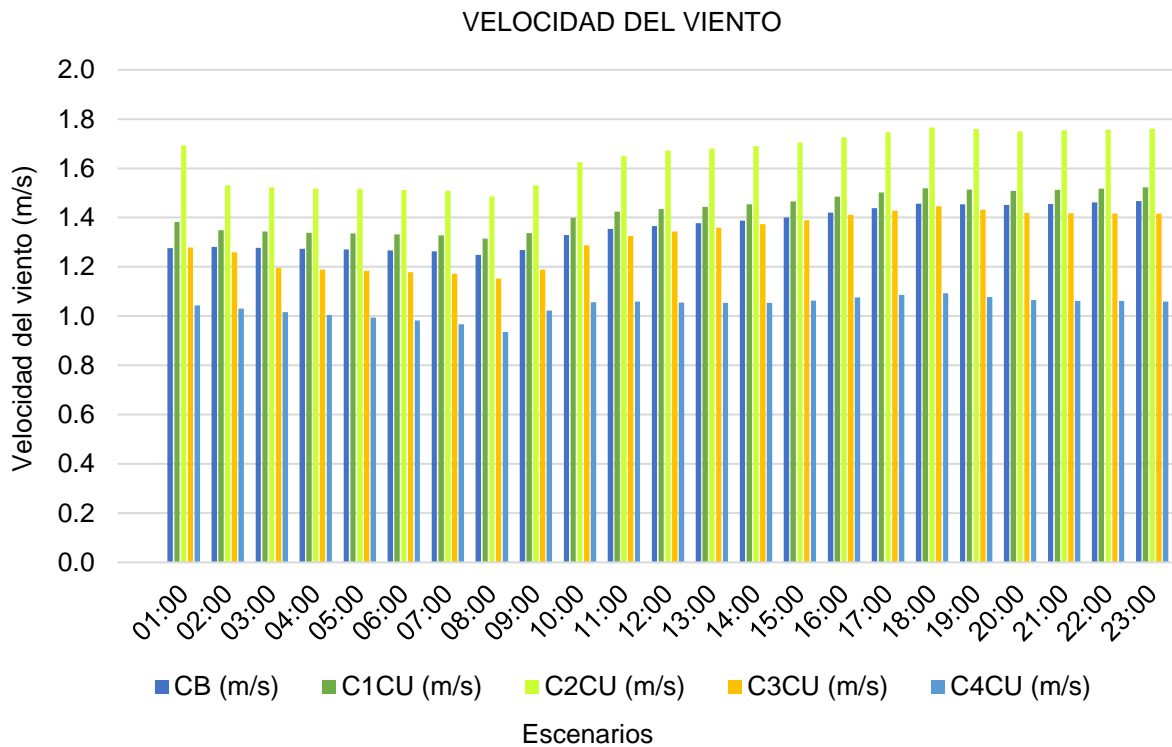
Min: 44.94 °C
Max: 73.11 °C

4.1.3. Velocidad del viento

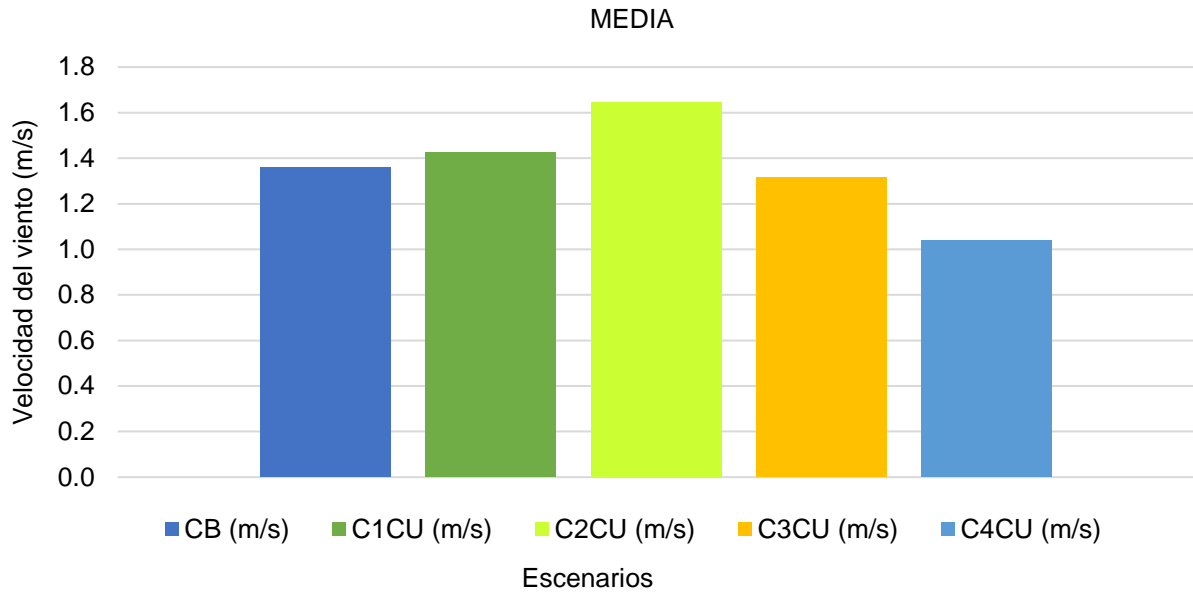
Como se muestra en la Figura 69, en el escenario CB, los valores que presenta la Velocidad del Viento (Wind.S.), oscilan entre 1,25 m/s como valor mínimo (a las 08 h 00) y 1,47 m/s como valor máximo (a las 23 h 00), con una media de 1,36 m/s; en el

escenario C1CU el valor de la mínima es de 1,32 m/s (a las 08 h 00) y la máxima de 1,52 m/s (a las 18 h 00, 22 h 00 y a las 23 h 00), mientras la media fue de 1,42 m/s; en el escenario C2CU presenta un valor de la mínima de 1,49 m/s (a las 08 h 00) y de 1,77 m/s como máxima (a las 18 h 00), con una media de 1,65 m/s; en el caso C3CU los valores que muestra, oscilan entre los 1,15 m/s (a las 08 h 00) como valor mínimo y 1,45 m/s (a las 18 h 00) como valor máximo, mientras la media fue de 1,32 m/s; en el escenario C4CU el valor de la mínima es de 0,94 m/s (a las 08 h 00) y el la máxima es de 1,09 m/s (a las 17 h 00 y 18 h 00), con una media de 1,04 m/s (para consultar los datos climáticos **ver Apéndice C**).

Figura 69. a) Análisis de comparación de la Velocidad del viento registrada en la simulación a distintas horas, b) Análisis de comparación de medias de la Velocidad del viento.



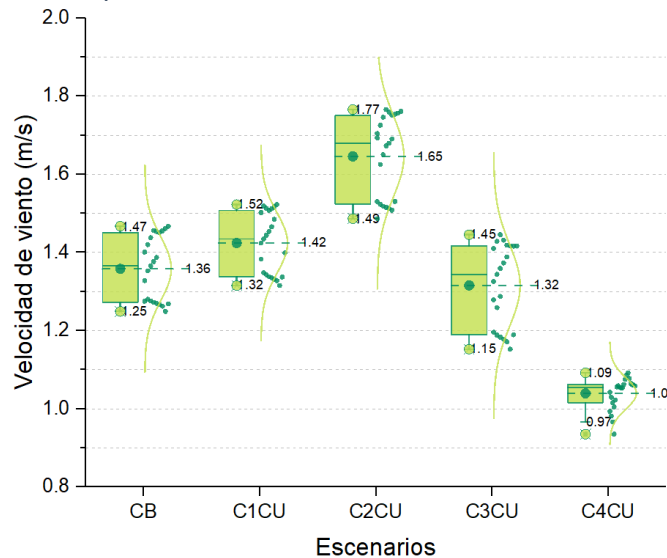
a)



b)

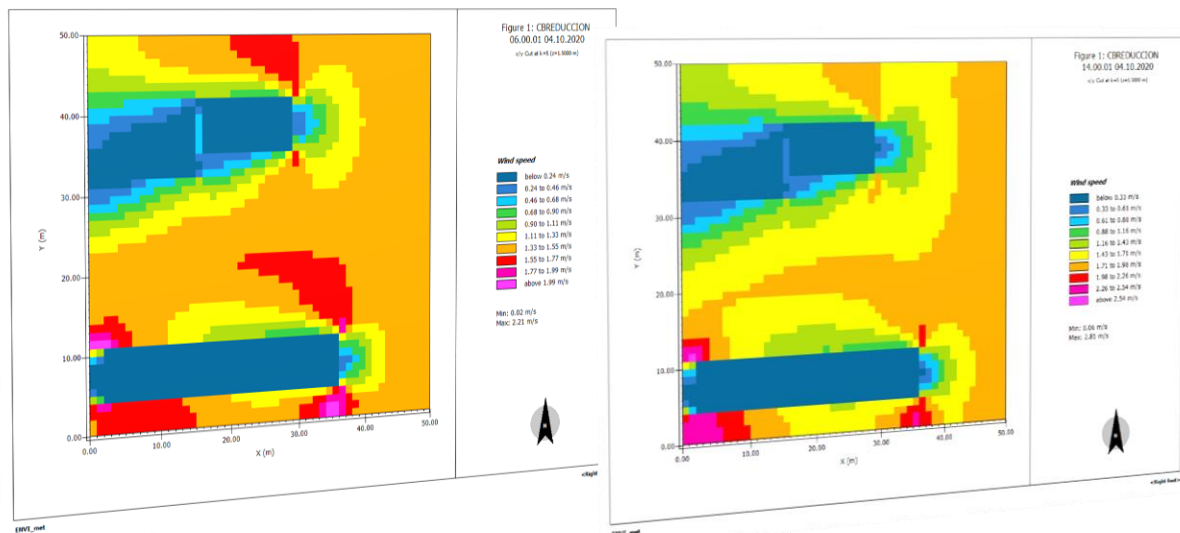
En la Figura 70, se muestra la comparación de la Wind.S. a 1,5 m en los diferentes escenarios de simulación. Los límites superior e inferior de los diagramas de caja indican los percentiles en sus límites inferior por el Q1 (Perc 25) y Q3 (Perc 25), los puntos verdes dentro de las barras muestran el valor medio y los puntos que sobresalen a los extremos de las barras muestran el valor mínimo en la parte inferior y el máximo en la parte superior. El perfil de dispersión de los datos que están al costado de las cajas es una curva de distribución normal.

Figura 70. Gráfico boxplot de la Velocidad del viento en los escenarios de simulación



A continuación, se muestran los diagramas de Wind.S. obtenidos a través de la simulación realizada con el software ENVI-met v4.4.3 para los escenarios de modelación CB, C1CU, C2CU, C3CU y C4CU para las horas relevantes de este estudio. Como se muestra en la Figura 71, en el CB a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 0,02 m/s y máximo de 2,21 m/s, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 0,06 m/s y el máximo de 2,81 m/s.

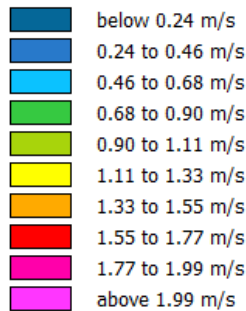
Figura 71. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Velocidad del viento a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario CB a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

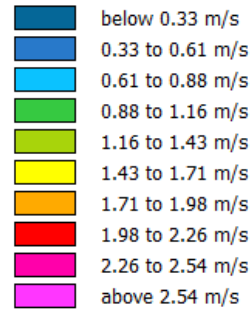
14 h 00

Wind speed



Min: 0.02 m/s
Max: 2.21 m/s

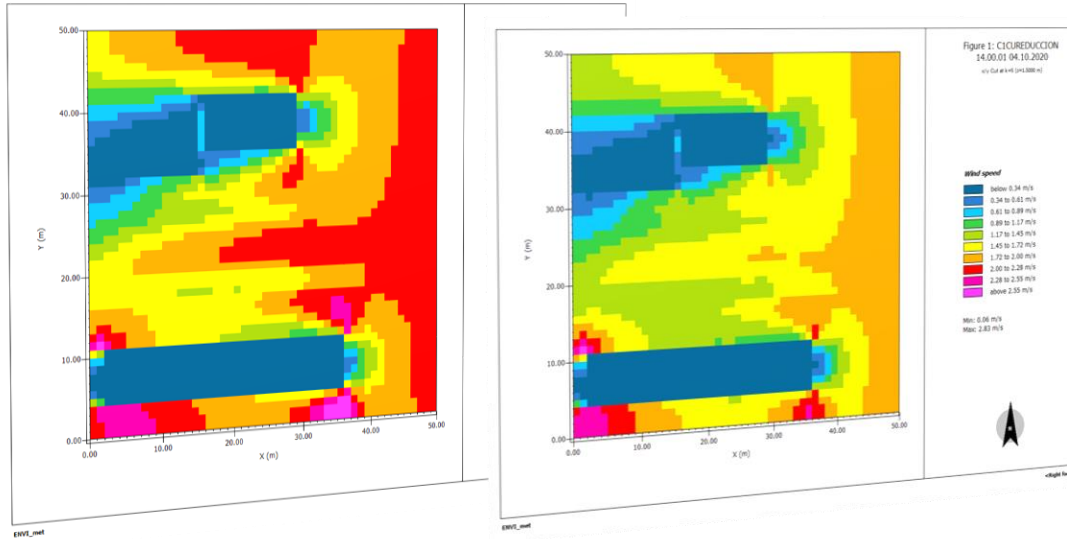
Wind speed



Min: 0.06 m/s
Max: 2.81 m/s

Como se muestra en la Figura 72, en el C1CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 0,01 m/s y máximo de 2,10 m/s, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 0,06 m/s y el máximo de 2,83 m/s.

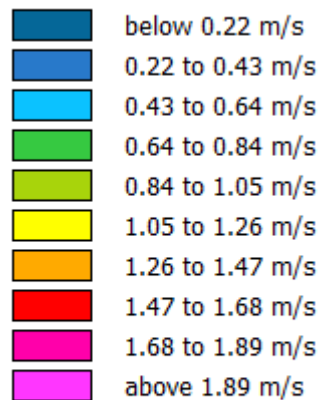
Figura 72. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Velocidad del viento a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C1CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

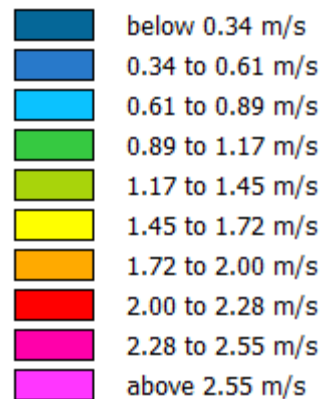
14 h 00

Wind speed



Min: 0.01 m/s
Max: 2.10 m/s

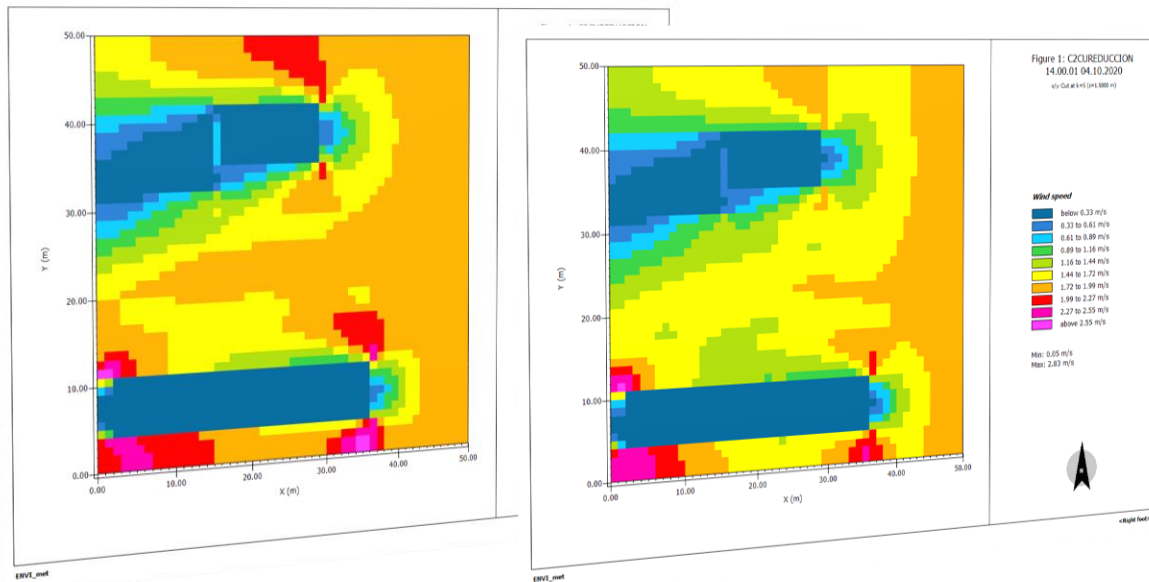
Wind speed



Min: 0.06 m/s
Max: 2.83 m/s

Como se muestra en la Figura 73, en el C2CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 0,00 m/s y máximo de 2,23 m/s, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 0,05 m/s y el máximo de 2,83 m/s.

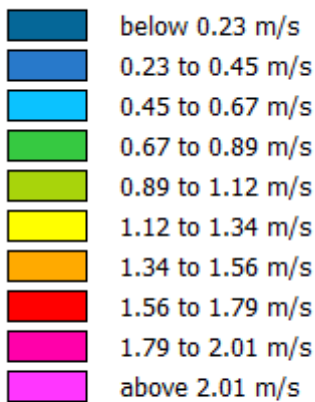
Figura 73. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Velocidad del viento a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C2CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

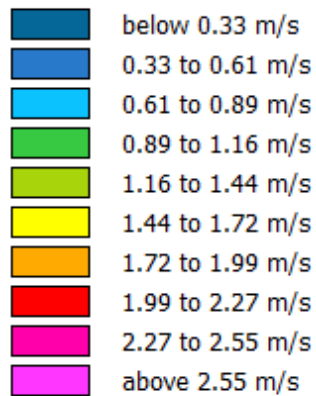
14 h 00

Wind speed



Min: 0.00 m/s
Max: 2.23 m/s

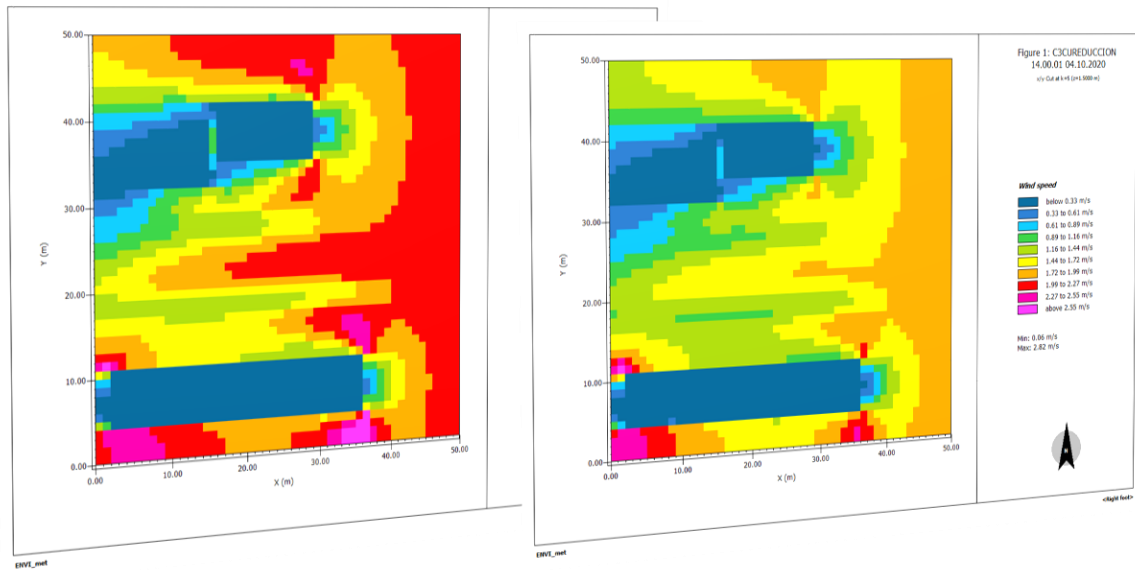
Wind speed



Min: 0.05 m/s
Max: 2.83 m/s

Como se muestra en la Figura 74, en el C3CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 0,00 m/s y máximo de 2,06 m/s, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 0,06 m/s y el máximo de 2,82 m/s.

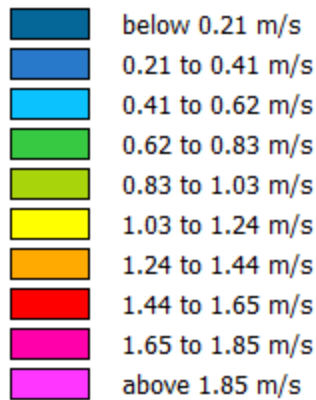
Figura 74. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Velocidad del viento a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C3CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

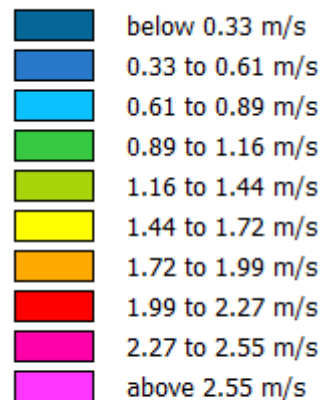
14 h 00

Wind speed



Min: 0.00 m/s
Max: 2.06 m/s

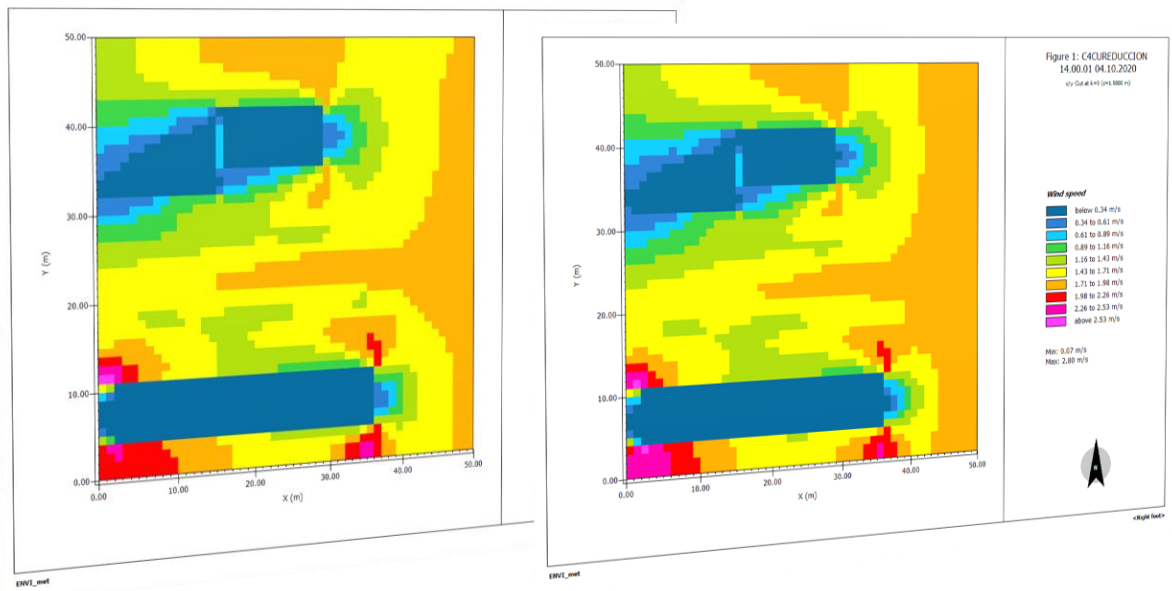
Wind speed



Min: 0.06 m/s
Max: 2.82 m/s

Como se muestra en la Figura 75, en el C4CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 0,00 m/s y máximo de 2,48 m/s, mientras que a las 14 h 00 el valor mínimo fue de 0,07 m/s y el máximo de 2,80 m/s.

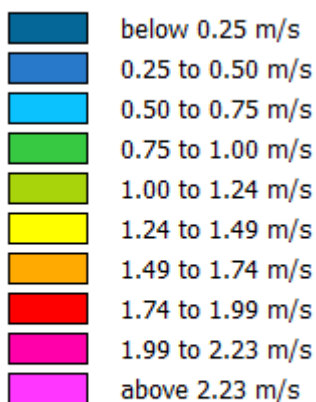
Figura 75. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar la Velocidad del viento a las 06 h 00 y 14 h 00 en el escenario C4CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met



06 h 00

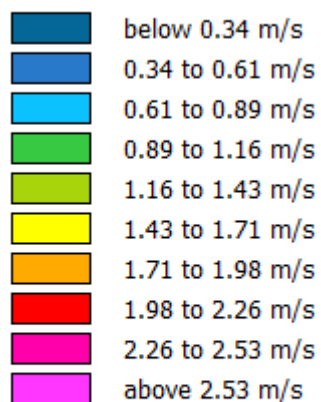
14 h 00

Wind speed



Min: 0.00 m/s
Max: 2.48 m/s

Wind speed



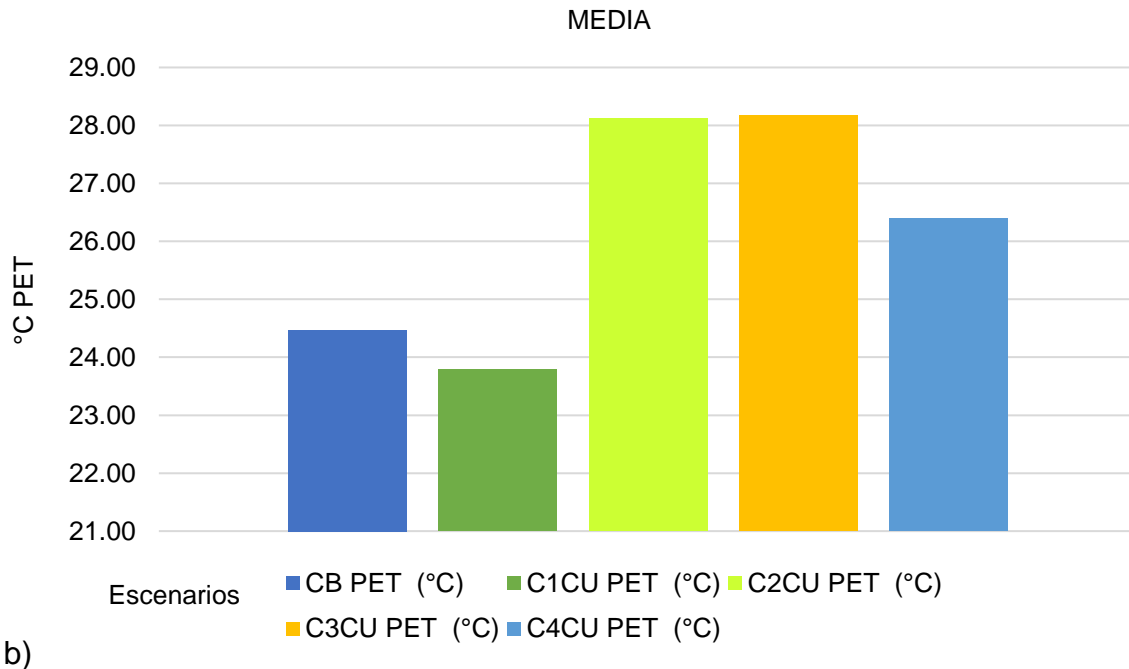
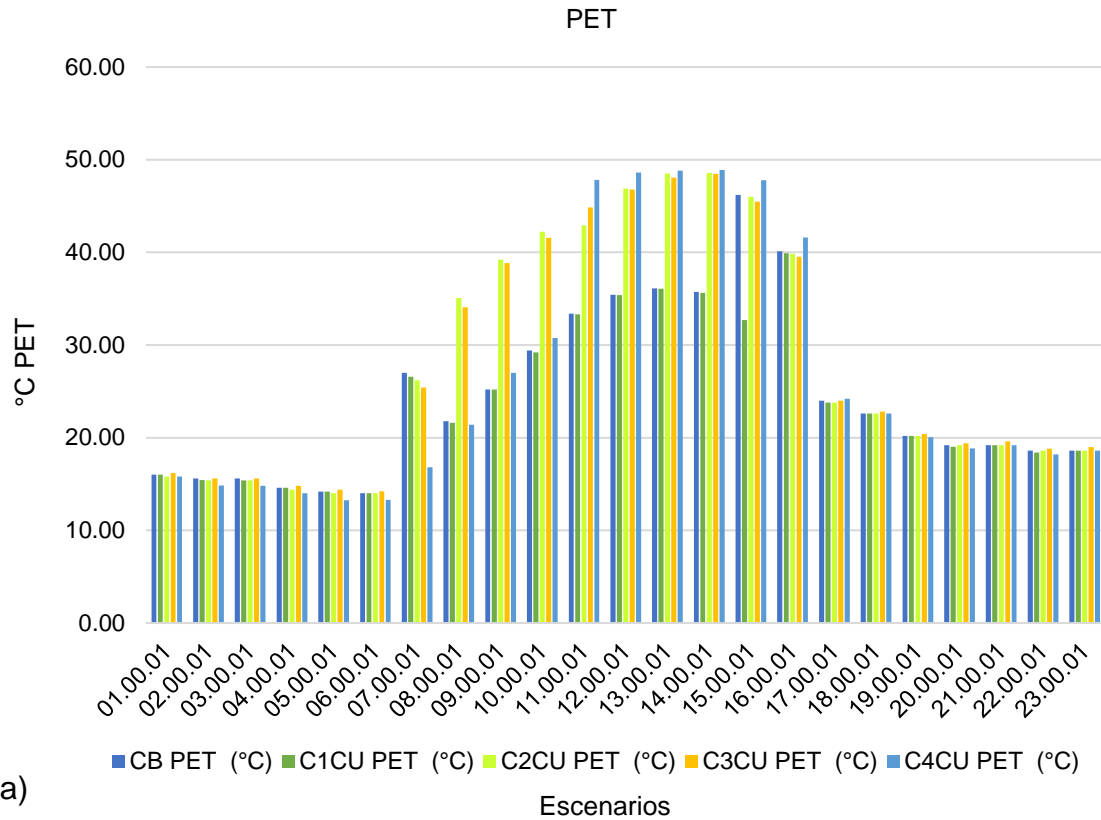
Min: 0.07 m/s
Max: 2.80 m/s

4.2. Comparación del Confort térmico Humano (PET)

Las configuraciones tuvieron un horario de protagonismo al reducir sus °C en el PET, a comparación del CB, el cual presento su valor mínimo de 14,00 °C a las 06 h 00 y su valor máximo de 46,16 °C a las 15 h 00, mientras que la media fue de 24,47 °C; para el escenario C1CU, los valores oscilaron entre los 14,00 °C como valor mínimo, a las 06 h 00 y 39,92 °C como valor máximo, a las 16 h 00, mientras que la media fue de 27,79 °C; para el escenario C2CU, los valores oscilaron entre los 14,00 °C como valor mínimo a las 06 h 00 y 48,58 °C como valor máximo a las 14 h 00, mientras que la media fue de 28,11 °C; para el escenario C3CU, los valores oscilaron entre los 14,23 °C como valor mínimo a las 06 h 00 y 48,47 °C como valor máximo a las 14 h 00, mientras que la media fue de 28,17 °C; para el escenario C4CU, los valores oscilaron entre los 13,24 °C como valor mínimo a las 05 h 00 y 48,91 °C como valor máximo a las 14 h 00, mientras que la media fue de 26,40 °C (

Figura 76 76) (para consultar los datos del PET **ver Apendice C**).

Figura 76. a) Análisis de comparación del índice PET registrado en la simulación a distintas horas, b) Análisis de comparación de medias del índice PET

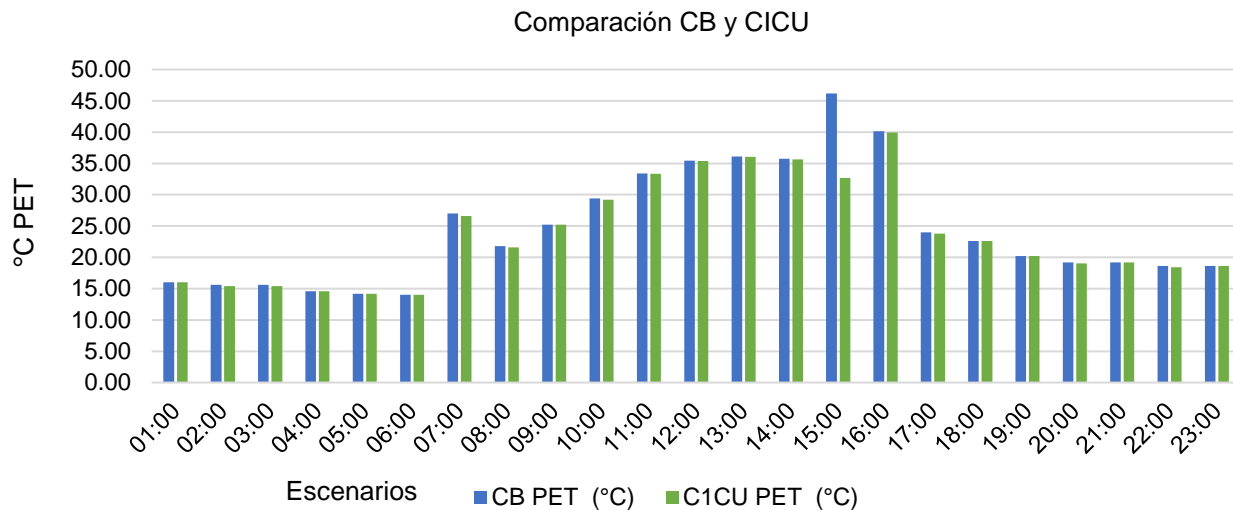


4.2.1. C1CU (04 de octubre)

Como se muestra en la Figura 77, la configuración C1CU presentó óptimos resultados, en todos los horarios se mostró una reducción o se mantuvo en iguales

condiciones de °C a comparación del CB. La igualdad de condiciones entre escenarios se presenta de las 04 h 00 a las 06 h 00 y a las 23 h 00. A las 15 h 00, la hora crítica del CB, se obtuvo una reducción de 13,49 °C, con la utilización de 10 árboles dentro del área.

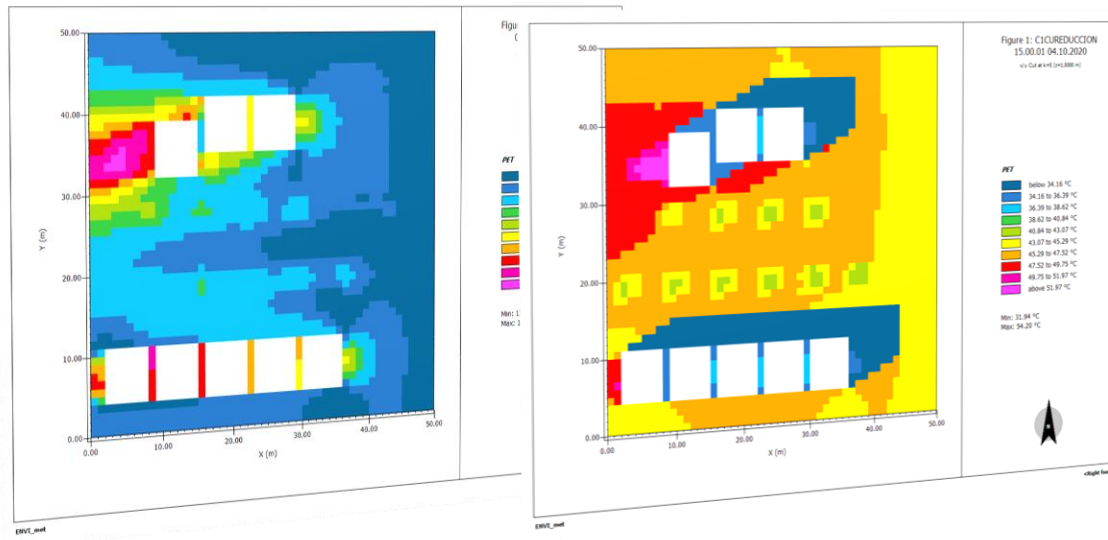
Figura 77. Comparación de PET horario entre escenario CB y C1CU



A continuación se muestran las distribuciones de °C PET obtenidas para el análisis de las 06 h 00 y las 15 h 00 en el escenario C1CU, donde es posible observar diferencias de temperaturas tanto en su mínima como en su máxima, observada principalmente en el área de implementación de la vegetación, influenciada por el efecto de sombreado.

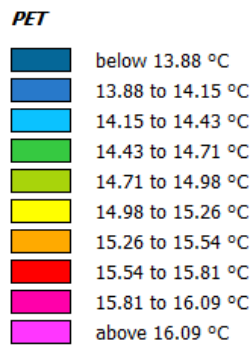
Como se muestra en la Figura 78, en el C1CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 13,60 °C y máximo de 16,37 °C, mientras que a las 15 h 00 el valor mínimo fue de 31,94 °C y el máximo de 54,20 °C.

Figura 78. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar el índice PET a las 06 h 00 y 15 h 00 en el escenario C1CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.

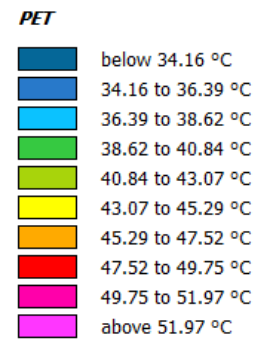


06 h 00

15 h 00



Min: 13.60 °C
Max: 16.37 °C

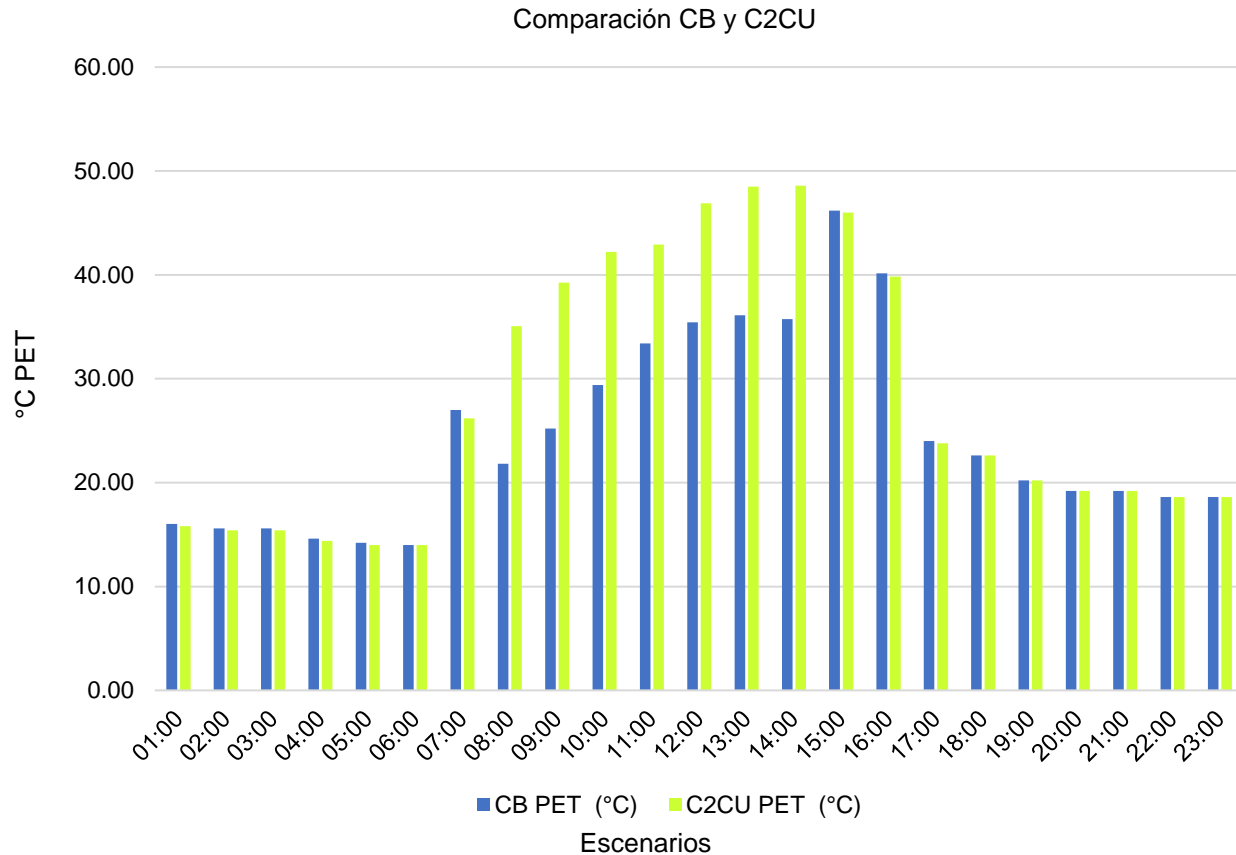


Min: 31.94 °C
Max: 54.20 °C

4.2.3. C2CU (04 de octubre)

En el caso del escenario C2CU, se visualiza una reducción de °C de las 01 h 00 hasta las 05 h 00 y posterior a ese momento se aprecian igualdad de condiciones con el CB a las 06 h 00 h, seguido por otra reducción a las 07 h 00. A las 08 h 00 se muestra un aumento de °C hasta llegar a las 14 h 00. La disminución de °C empieza desde las 15 h 00, hasta la terminación del día simulado. A las 15 h 00, la hora crítica del CB, se obtuvo una reducción de 0,20 °C, con la utilización de 5 árboles dentro del área (Figura 79).

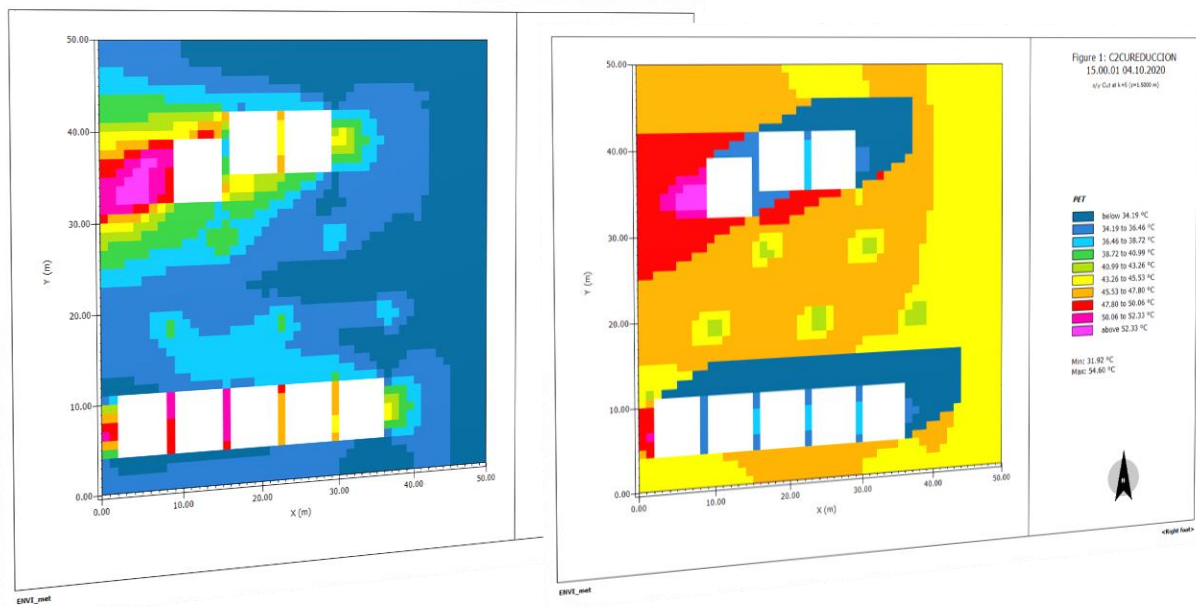
Figura 79. Comparación de PET horario entre escenario CB y C2CU



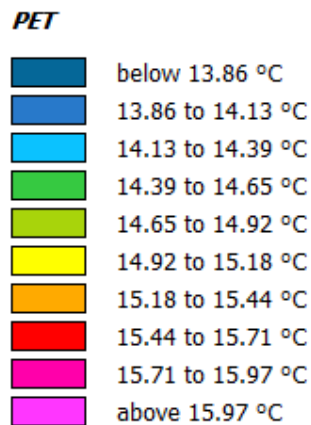
A continuación, se muestran las distribuciones de °C PET obtenidas para el análisis de las 06 h 00 y las 15 h 00 del caso C2CU, donde es posible observar diferencias de temperaturas tanto en su mínima como en su máxima, observada principalmente en el área de implementación de la vegetación, influenciada por el efecto de sombreado.

Como se muestra en la Figura 80, en el C2CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 13,60 °C y máximo de 16,24 °C, mientras que a las 15 h 00 el valor mínimo fue de 31,92 °C y el máximo de 54,60 °C.

Figura 80. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar el índice PET a las 06 h 00 y 15 h 00 en el escenario C2CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.

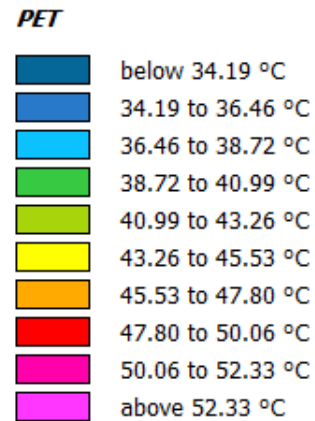


06 h 00



Min: 13.60 °C
Max: 16.24 °C

15 h 00



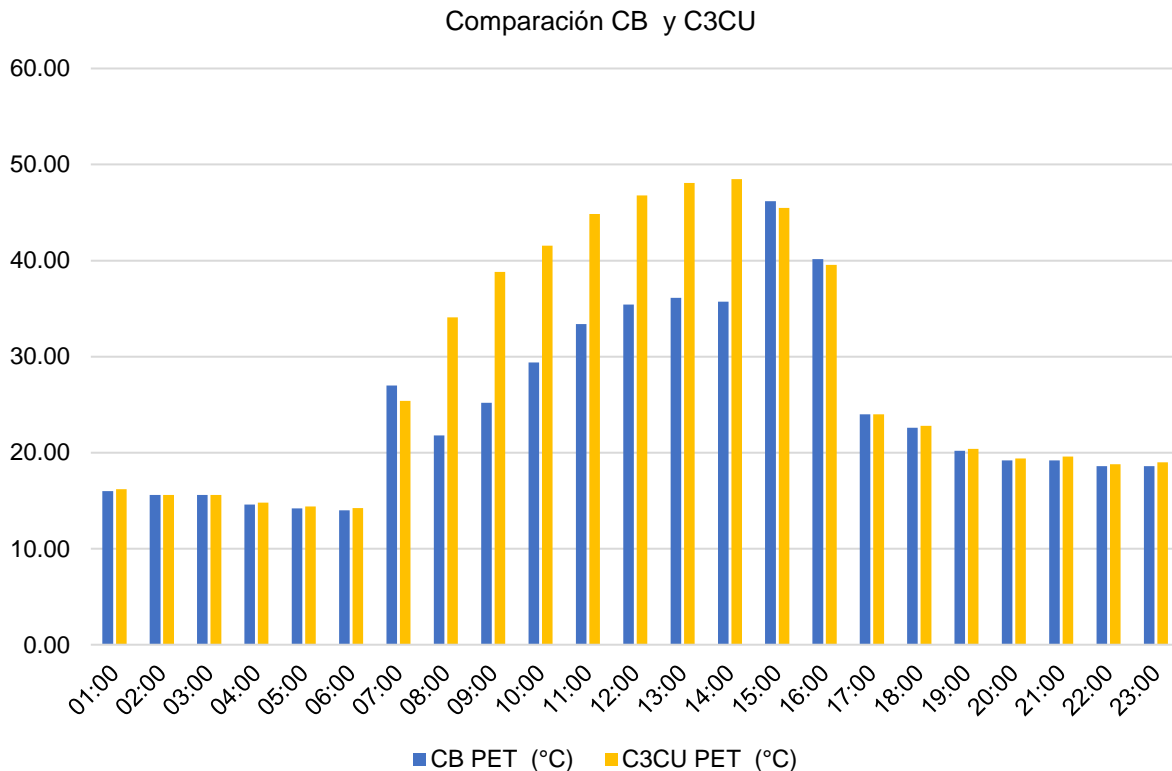
Min: 31.92 °C
Max: 54.60 °C

4.2.4. C3CU (04 de octubre)

En comparación al CB, como se muestra en la Figura 81, la configuración C3CU muestra una predominación en el aumento de °C, específicamente a las 01 h 00, de las 04 h 00 a las 06 h 00, de las 08 h 00 a las 14 h 00 y de las 18 h 00 a las 23 h 00.

Los °C se mantuvieron en valores iguales al CB, de las 02 h 00 a las 03 h 00 y a las 17 h 00. La reducción se presentó a las 07 h 00 y de las 15 h 00 a las 16 h 00, particularmente a las 15 h 00 (hora crítica del CB) tal reducción fue de 0,70 °C, con la utilización de 20 árboles dentro del área.

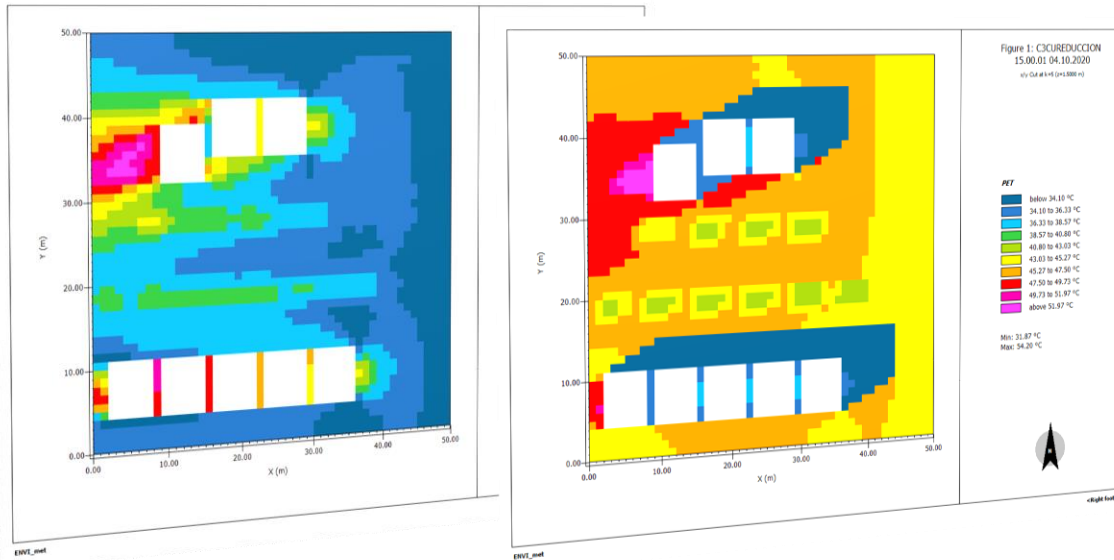
Figura 81. Comparación de PET horario entre escenario CB y C3CU



A continuación, se muestran las distribuciones de °C PET obtenidas para el análisis de las 06 h 00 y las 15 h 00 del caso C3CU, donde es posible observar diferencias de temperaturas tanto en su mínima como en su máxima, observada principalmente en el área de implementación de la vegetación, influenciada por el efecto de sombreado.

Como se muestra en la Figura 82, en el C3CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 13,60 °C y máximo de 16,37 °C, mientras que a las 15 h 00 el valor mínimo fue de 31,87 °C y el máximo de 54,20 °C.

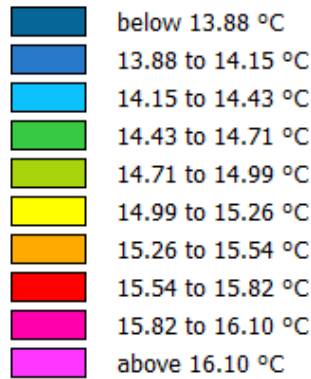
Figura 82. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar el índice PET a las 06 h 00 y 15 h 00 en el escenario C3CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.



06 h 00

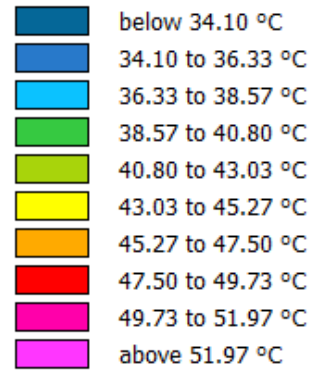
15 h 00

PET



Min: 13.60 °C
Max: 16.37 °C

PET



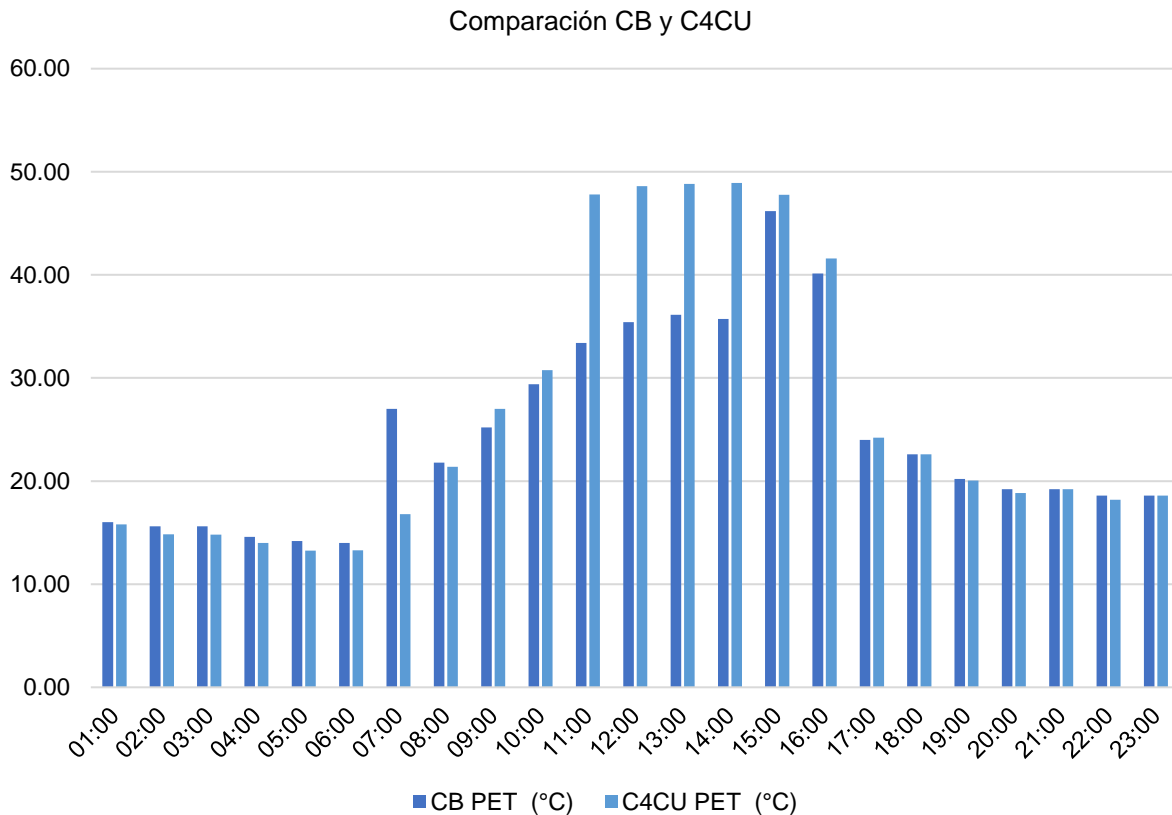
Min: 31.87 °C
Max: 54.20 °C

4.2.5. C4CU (04 de octubre)

Como se muestra en la Figura 83, en comparación con el caso CB, el escenario C4CU presenta una reducción de °C de la 01 h 00 a las 03 h 00, de las 05 h 00 a las

08 h 00, de las 19 h 00 a las 20 h 00 y a las 22 h 00. Por otro lado, el aumento de °C se presenta de las 10 h 00 a las 18 h 00. La igualdad de condiciones se muestra a las 04 h 00, las 21 h 00 y las 23 h 00. Cabe mencionar que es el único escenario, donde se visualiza un mayor valor de °C a las 15 h 00 hrs en comparación al CB. Tal aumento fue de 1,59 °C, con un total de 10 árboles en el area de estudio.

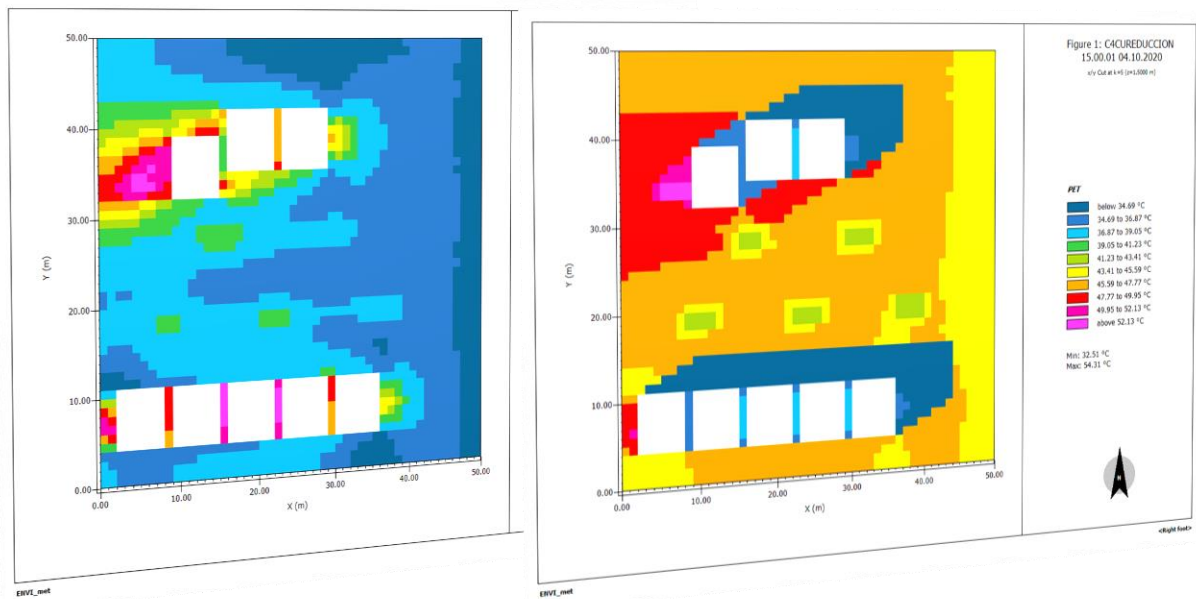
Figura 83. Comparación de PET horario entre escenario CB y C4CU



A continuación, se muestran las distribuciones de °C PET obtenidas para el análisis de las 06 h 00 y las 15 h 00 del caso C4CU, donde es posible observar diferencias de temperaturas tanto en su mínima como en su máxima, observada principalmente en el área de implementación de la vegetación, influenciada por el efecto de sombreado.

Como se muestra en la Figura 84, en el C4CU a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 12,40 °C y máximo de 15,22 °C, mientras que a las 15 h 00 el valor mínimo fue de 32,51 °C y el máximo de 54,31 °C.

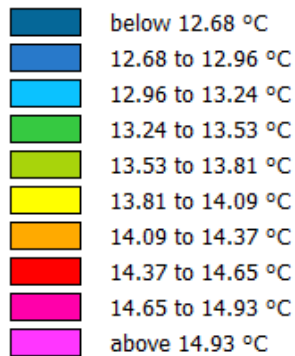
Figura 84. Mapas del día 04 de octubre del 2020, para comparar el índice PET a las 06 h 00 y 15 h 00 en el escenario C4CU a 1.50 m, simulado en ENVI-met.



06 h 00

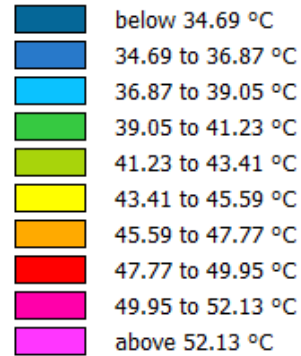
15 h 00

PET



Min: 12.40 °C
Max: 15.22 °C

PET

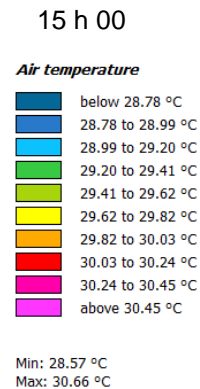
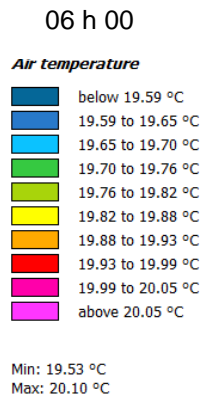
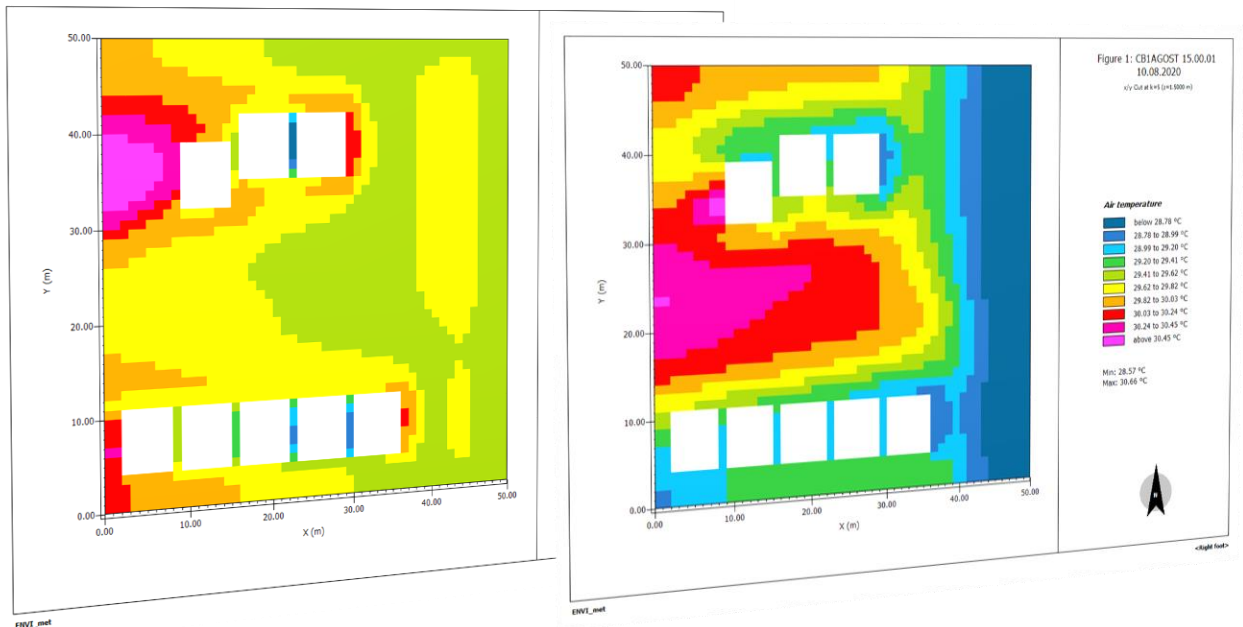


Min: 32.51 °C
Max: 54.31 °C

4.2.6. CB (día típico)

Los datos fueron utilizados para validar el modelo de simulación del caso base (CB), en el software ENVI-met a 1,5 m. Se analizaron las 06 h 00 y las 15 h 00, al presentar los valores mínimos y máximos según el análisis climático anteriormente mencionado, a través de la BAT. Como muestra la Figura 85, a las 06 h 00 se presentó un valor mínimo de 19,53 °C y máximo de 20,10 °C, mientras que a las 15 h 00 el valor mínimo fue de 28,57 °C y el máximo de 30,66 °C (para consultar los datos **ver Apéndice D**).

Figura 85. Mapas térmicos del día típico (1 de agosto) para comparar la Temperatura del Aire a las 06 h 00 y 15 h 00 en el escenario CB



CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES

En la presente sección se abordan un análisis de resultados de la investigación, así como recomendaciones para futuras investigaciones.



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

5.1. Contribuciones

Este trabajo explora el diseño de distribución patrones de plantación de árboles en aceras para áreas residenciales, para mejorar el confort térmico en la ciudad de Ensenada, B.C. El modelado ENVI-met se utiliza para simular las condiciones térmicas de varias configuraciones de de vegetación de árboles individuales y agrupados. Los modelos de simulación del presente estudio, demostrarán que ubicaciones y arreglos de los árboles pueden modificar los microclimas exteriores y el confort térmico humano. Los resultados de la investigación reafirman la frase *"El árbol correcto, en el lugar correcto"* (Santamouris et al., 2018), ya que dependiendo de la configuración, varía la efectividad de mitigación de °C.

Coincidiendo con distintas investigaciones, por ejemplo el estudio de Zhao et al., (2018), múltiples "puntos fríos" individuales con arreglos de árboles efectivos en el vecindario crean un vecindario más fresco en general; y con el estudio de Zhang et al., (2018), donde los árboles en el caso "disperso" 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 en áreas 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.

5.2. Comprobación de hipótesis y objetivos

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 el confort térmico en exteriores. A través de los resultados del presente estudio, se muestra que una configuración dispersa, con dosel grande y una hoja de mayor tamaño, presenta la suficiente calidad de sombreado, y una disminución en la temperatura del aire y de las superficies en los alrededores.

Respondiendo al objetivo general y a la pregunta de investigación ¿Qué configuración de vegetación proporciona un mayor efecto de enfriamiento en el área residencial Villas del Cedro, de la ciudad de Ensenada?; la comparación entre diferentes ubicaciones y número de árboles del presente estudio, revela que para maximizar los beneficios de enfriamiento, se sugiere utilizar arreglos de árboles individuales a 7,0 m de distancia uno de otro, como se muestra en el C1CU.

La especie *Cupressus forbesii* presentó las características ideales, como la densidad del follaje y las dimensiones adecuadas para el área residencial Villas del Cedro (área de estudio), sin provocar problemas por obstrucción de la circulación; tales características muestran un sombreado predominante todo el año, al ser un árbol de hoja perenne. En cuanto a los °C PET, se vieron afectados negativamente los escenarios C3CU Y C4CU en la mayoría de los horarios al utilizar agrupaciones de dos árboles con la corona traslapada, ya que en lugar de disminuir los valores de °C, los aumentaron, 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.

Como se mencionó anteriormente, el enfriamiento no se mostró en todas las horas, si no en ciertos períodos que varían entre configuraciones. En comparación con el CB, el C1CU se presentó una reducción de °C a las 01 h 00 a las 03 h 00 (0,01 a 0,20 °C, de las 07 h 00 (0,40 °C) a las 08 h 00 (0,20 °C), de las 10 h 00 a las 17 h 00 (0,20 a 13,49 °C), a las 20 h 00 (0,18 °C) y a las 22 h 00 (0,20 °C); en el C2CU se visualizó una reducción de °C de las 01 h 00 hasta las 05 h 00 (0,20 a 0,21°C), a las 07 h 00 (de 0,8°C), de las 15 h 00 a las 17 h 00 (0,20 a 0,29 °C); el C3CU presentó una reducción de °C a las 07 h 00 (de 1,6 °C) y de las 15 h 00 (de 0,7 °C) a las 16 h 00 (de 0,6 °C); el C4CU presentó una reducción de °C de la 01 h 00 a las 03 h 00 (0,8 a 0,75 °C) , de las 05 h 00 a las 08 h 00 (0,4 a 10,2 °C), de las 19 h 00 (de 0,15 °C) a las 20 h 00 (de 0,35 °C) y a las 22 h 00 (0,4 °C). Es decir que en el C1CU la mayor reducción de temperatura se presentó a las 15 h 00, en el C2CU a las 07 h 00, en el C3CU a las 15 h 00 y en el C4CU fue a las 07 h 00.

En comparación con el CB, a las 15 h 00 (hora con mayor °C PET) todos los escenarios a excepción de C4CU, presentaron una disminución de los °C. En el escenario C1CU se mostró una disminución de 13,49 °C; en el C2CU se mostró una disminución de 0,2 °C; en el C3CU la disminución fue de 0,7 °C. En el escenario C4CU los se mostró una elevación de 1,59 °C. Por otro lado a las 06 h 00 (la hora con menor °C PET), el escenario C1CU y C2CU se mantuvieron en iguales condiciones con el CB (14,00 °C); el escenario C3CU presento un aumento de 0,23 °C y el C4CU fue el único escenario que mostró una disminución de 0,71 °C. Tales resultados demostraron un desempeño eficaz para los arreglos con intervalos individuales de árboles con 3,0 m de ancho de la corona y 3,0 m de alto, como lo es el *Cupressus forbesii*.

En general se considera al C1CU como el mejor escenario ya que presentó la mayor disminución de °C durante la hora más cálida y en todo horario redujo o se mantuvo en iguales condiciones en comparación al CB.

5.3. Futuras investigaciones

Es importante mencionar que se deben realizar estudios similares utilizando varios diseños de edificios y en las distintas estaciones del año. Las recomendaciones de ubicación y disposición de los árboles en el área residencial Villas del Cedro, pueden no ser efectivas en otra zona climática, al igual que, otras especies de árboles con diferente tipo de hoja, altura de árbol, LAI y tamaño de copa pueden recomendar resultados diferentes de esta investigación. Más allá de los presentes hallazgos, una combinación de varias estrategias debería ser adoptada en el diseño de paisajes urbanos peatonales, para reducir la carga térmica del entorno urbano.

Como ya se mencionó, las mediciones se hicieron en una sola calle del área residencial, pero se recomienda que a futuro, se realice una simulación y monitoreo a mayor escala. Por otro lado, a partir del presente trabajo se pueden estudiar cuestiones de albedo de las superficies u otras combinaciones de estrategias de mitigación del calor urbano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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>
- Aboelata, A., & Sodoudi, S. (2020). Evaluating the effect of trees on UHI mitigation and reduction of energy usage in different built up areas in Cairo. *Building and Environment*, 168(October 2019), 106490. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106490>
- 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>
- 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)
- 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. (n.d.). Potencial de las Herramientas de Simulación para la Planificación Sustentable Simulation. *Acta Del I Encuentro Nacional Sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable*, 425–436. Retrieved from http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/59417/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41(2), 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.013>
- Almusaed, A. (2011). Biophilic and Bioclimatic Architecture. In *Biophilic and Bioclimatic Architecture*. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-534-7>

- Ana Cristina Nafarrate Hecht. (2017). *Estimación directa e indirecta del índice de área foliar (IAF) y su modelación con Lidar en un bosque tropical seco de Yucatán*. 80.
- Andoni, H., & Wonorahardjo, S. (2018). A Review on Mitigation Technologies for Controlling Urban Heat Island Effect in Housing and Settlement Areas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 152(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/152/1/012027>
- 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*.
- 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>
- Bruse, M. (2004). *ENVI-met 3.0: Updated Model Overview*. (March), 1–12.
- Bruse, M. (2014). *Using ENVI-met met BioMet*.
- 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>
- Chatterjee, S., Khan, A., Dinda, A., Mithun, S., Khatun, R., Akbari, H., ... Wang, Y. (2019). Simulating micro-scale thermal interactions in different building

- environments for mitigating urban heat islands. *Science of the Total Environment*, 663(February), 610–631. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.299>
- Chávez del Valle, F. J., Concepto, E., Generales, C., Variable, Z., Ramos, S., Rybczynski, W., ... Variable, Z. (2002). Zona variable de confort térmico. *Capítulo 2*, 3, 36.
- Chen, L., & Ng, E. (2012). Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade. *Cities*, 29(2), 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.08.006>
- Colter, K. R., Middel, A. C., & Martin, C. A. (2019). Effects of natural and artificial shade on human thermal comfort in residential neighborhood parks of Phoenix, Arizona, USA. *Urban Forestry and Urban Greening*, 44(July 2018), 126429. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126429>
- Darvish, A., Eghbali, G., & Rahman, S. (2021). Urban Climate Tree-configuration and species effects on the indoor and outdoor thermal condition and energy performance of courtyard buildings. *Urban Climate*, 37(March), 100861. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100861>
- 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>
- Djamila, H., & Yong, T. L. (2016). A study of Köppen-Geiger system for comfort temperature prediction in Melbourne city. *Sustainable Cities and Society*, 27, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.08.009>
- 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>
- Fabbri, K., Di Nunzio, A., Gaspari, J., Antonini, E., & Boeri, A. (2017). Outdoor Comfort: The ENVI-BUG tool to Evaluate PMV Values Output Comfort Point by Point. *Energy Procedia*, 111(September 2016), 510–519. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.213>

- Fahmy, M., Mahdy, M., Mahmoud, S., Abdelalim, M., Ezzeldin, S., & Attia, S. (2020). Influence of urban canopy green coverage and future climate change scenarios on energy consumption of new sub-urban residential developments using coupled simulation techniques: A case study in Alexandria, Egypt. *Energy Reports*, 6, 638–645. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.042>
- Firdausah, A. M., & Wonorahardjo, S. (2018). Typology Study of Urban Canyon in Residential Area and the Quality of Its Thermal Environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 152(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/152/1/012025>
- 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>
- Gui, X., Wang, L., Yao, R., Yu, D., & Li, C. (2019). Investigating the urbanization process and its impact on vegetation change and urban heat island in Wuhan, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30808–30825. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06273-w>
- 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>
- 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)
- 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>
- Luna, L., Moreno, F., Roldán, J., & Cienfuegos, I. (2004). Influencia de la vegetación en el balance hídrico superficial de la cuenca hidrológica de “ El Cabril .” *Revista Ingeniería Del Agua.*, (1971). Retrieved from www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2011/pdf/p498.pdf
- 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>
- Martínez, J. C. R., & Freixanet, V. A. F. (2014). An alternative to facilitate and streamline preliminary studies. *Energy Procedia*, 57(55), 1374–1382. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.128>
- 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>
- Milošević, D. D., Bajšanski, I. V., & Savić, S. M. (2017). Influence of changing trees locations on thermal comfort on street parking lot and footways. *Urban Forestry and Urban Greening*, 23, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.011>
- Morakinyo, T. E., Kong, L., Lau, K. K. L., Yuan, C., & Ng, E. (2017). A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood’s thermal comfort. *Building and Environment*, 115, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.005>
- Morakinyo, T. E., Lau, K. K. L., Ren, C., & Ng, E. (2018). Performance of Hong Kong’s common trees species for outdoor temperature regulation, thermal comfort and

- energy saving. *Building and Environment*, 137(January), 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.012>
- Morakinyo, T. E., Ouyang, W., Lau, K. K. L., Ren, C., & Ng, E. (2020). Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation. *Science of the Total Environment*, 719(March), 137461. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137461>
- Müller, N., Kuttler, W., & Barlag, A. B. (2014). Counteracting urban climate change: Adaptation measures and their effect on thermal comfort. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1–2), 243–257. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0890-4>
- 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>
- 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>
- ONSET ©. (2021). HOBO ® U12-006 Data Logger. Retrieved from <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-006/>
- Otazo, E. Bravo, J. Pulido, M. (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
- 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(March), 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, L. L. H., & Jim, C. Y. (2013). Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation. *Energies*, 6(2), 598–618. <https://doi.org/10.3390/en6020598>
- Perini, K., Chokhachian, A., Dong, S., & Auer, T. (2017). Modeling and simulating urban outdoor comfort: Coupling ENVI-Met and TRNSYS by grasshopper. *Energy and Buildings*, 152, 373–384. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.061>
- Priyadarsini, R. (2009). Urban heat island and its impact on building energy consumption. *Advances in Building Energy Research*, 3(1), 261–270. <https://doi.org/10.3763/aber.2009.0310>
- Rahman, M. A., Stratopoulos, L. M. F., Moser-Reischl, A., Zölch, T., Häberle, K. H., Rötzer, T., ... Pauleit, S. (2020). Traits of trees for cooling urban heat islands: A meta-analysis. *Building and Environment*, 170(December 2019). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106606>
- 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. *Journal of Physics: Conference Series*, 1343(1). <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., Ding, W., & Shen, J. (2018). The impact of green space layouts on microclimate and air quality in residential districts of Nanjing, China. *Forests*, 9(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/f9040224>
- 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>
- 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>
- Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085–3102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>
- Santamouris, Mat, 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>
- Santos, T., Miguel, P. S., & Banda, P. (2019). Medio físico y natural. *Vamos San Nicolás de Los Garza*, 316, 400.
- Sekhar, C., Akimoto, M., Fan, X., Bivolarova, M., Liao, C., Lan, L., & Wargocki, P. (2020). A Study of the Impact of Major Urban Heat Island Factors in a Hot Climate Courtyard: The Case of the University of Sharjah, UAE. *Building and Environment*, 184(August), 107229. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102844>
- 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>
- Sharmin, T., Steemers, K., & Matzarakis, A. (2017). Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 34(February), 293–308. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.07.006>
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., & Erell, E. (2009). The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and Urban Planning*, 92(3–4), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.04.005>
- Sodoudi, S., Zhang, H., Chi, X., Müller, F., & Li, H. (2018). The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. *Urban Forestry and Urban Greening*, 34(June 2017), 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.06.002>
- 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>
- Sosa Griffin, M. E. (2004). Manual de diseño para edificaciones energéticamente eficientes en el trópico. In *Idec*. Retrieved from http://www.fau.ucv.ve/idec/racionalidad/pdf/manual_energia.pdf
- Spangenberg, J. (2007). SIMULATION OF URBAN MICROCLIMATES IN TROPICAL METROPOLIS' MARACANÁ/ RIO DE JANEIRO - A CASE STUDY. *Simulación de Microclimas Urbanos.*, 10.
- Spangenberg, J., Shinzato, P., Johansson, E., & Duarte, D. (2007). The Impact of Urban Vegetation on Microclimate in Hot Humid São Paulo. *Passive and Low Energy Architecture*, 24, (November).
- 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.jobee.2020.101262>
- Stocco, S., Cantón, A., & Correa, E. (2018). Alternativas de diseño para mejorar el desempeño ambiental de plazas urbanas de Mendoza (Argentina). Evaluación mediante simulación con ENVI-met 3.1. *Informes de La Construcción*, 70(550), 253. <https://doi.org/10.3989/ic.16.154>
- 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>
- 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. (2018). 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/>

Wang, B., & Yi, Y. K. (2021). Developing an adapted UTCI (Universal Thermal Climate Index) for the elderly population in China's severe cold climate region. *Sustainable Cities and Society*, 69(February), 102813. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102813>

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>

Wonorahardjo, S., Sutjahja, I. M., Mardiyati, Y., Andoni, H., Thomas, D., Achsani, 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>

Xiong, Y., Zhang, J., Xu, X., Yan, Y., Sun, S., & Liu, S. (2020). Strategies for improving the microclimate and thermal comfort of a classical Chinese garden in the hot-summer and cold-winter zone. *Energy and Buildings*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109914>

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>

Yahia, M. W., Johansson, E., Thorsson, S., Lindberg, F., & Rasmussen, M. I. (2018). Effect of urban design on microclimate and thermal comfort outdoors in warm-

- humid Dar es Salaam, Tanzania. *International Journal of Biometeorology*, 62(3), 373–385. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1380-7>
- Yang, Y., Gatto, E., Gao, Z., Buccolieri, R., Morakinyo, T. E., & Lan, H. (2019). The “plant evaluation model” for the assessment of the impact of vegetation on outdoor microclimate in the urban environment. *Building and Environment*, 159(December 2018), 106151. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.029>
- Yuan, J., Emura, K., & Farnham, C. (2017). Is urban albedo or urban green covering more effective for urban microclimate improvement?: A simulation for Osaka. *Sustainable Cities and Society*, 32, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.03.021>
- 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>
- Zhang, L., Zhan, Q., & Lan, Y. (2018a). Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters. *Building and Environment*, 130(December), 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.014>
- Zhang, L., Zhan, Q., & Lan, Y. (2018b). Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters. *Building and Environment*, 130(February 2019), 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.014>
- 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>

CAPÍTULO 7. APÉNDICE

APÉNDICE A. Datos de Data Loggers

En las siguientes tablas se muestran los datos climáticos (temperatura y humedad) extraídos de la data logger, el día 04 de octubre del 2020.

Tabla. Datos extraídos de HOBBO 6016

Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)
00:00	21,22	66,12
01:00	22,01	54,23
02:00	21,36	43,77
03:00	21,50	34,99
04:00	20,24	48,48
05:00	19,93	51,10
06:00	19,91	52,63
07:00	21,81	35,68
08:00	24,24	28,61
09:00	25,06	29,89
10:00	27,06	28,73
11:00	29,69	23,27
12:00	30,52	22,59
13:00	31,48	23,98
14:00	32,30	24,11
15:00	31,33	28,90
16:00	30,52	28,77
17:00	28,69	39,75
18:00	28,04	42,72
19:00	25,33	54,71
20:00	24,55	54,60
21:00	25,11	32,59
22:00	24,29	30,98
23:00	24,60	28,27

Tabla. Datos extraídos de HOBBO 6020

Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)
00:00	19,98	69,83
01:00	21,49	55,53
02:00	20,15	55,33
03:00	20,48	35,26
04:00	19,20	51,94
05:00	18,46	55,27
06:00	18,75	56,87
07:00	20,79	37,42
08:00	23,40	29,83
09:00	27,24	26,39
10:00	28,47	24,96
11:00	31,46	20,27
12:00	31,59	20,98
13:00	32,64	21,61
14:00	33,47	21,84
15:00	31,66	26,16
16:00	30,85	25,62
17:00	28,54	41,66
18:00	27,65	46,34
19:00	24,65	57,24
20:00	23,76	55,77
21:00	24,68	31,42
22:00	23,47	31,65
23:00	24,15	30,16
00:00	24,34	28,35

APÉNDICE B. Datos climáticos y PET del día típico

En la Tabla se muestran los datos climáticos y el índice de análisis de confort térmico PET del día típico a 1,5 m.

Tabla. Escenario CB con las condiciones climáticas del día típico del período cálido (1 agosto)

Fecha	Hora (h)	PET (°C)	Tair (°C)	Tmrt (°C)	H.S. (g/kg)
01.08.2020	01:00	15,92	21,70	12,90	13,99
01.08.2020	02:00	15,14	20,97	12,09	14,03
01.08.2020	03:00	14,66	20,51	11,55	14,31
01.08.2020	04:00	14,15	20,06	11,02	13,97
01.08.2020	05:00	13,72	19,68	10,57	13,66
01.08.2020	06:00	17,41	19,80	23,54	13,78
01.08.2020	07:00	29,52	21,46	52,06	15,03
01.08.2020	08:00	36,40	23,00	62,75	15,84
01.08.2020	09:00	39,71	24,20	67,00	15,29
01.08.2020	10:00	40,80	25,68	67,20	15,37
01.08.2020	11:00	41,40	27,28	66,06	15,47
01.08.2020	12:00	43,00	28,55	66,91	15,06
01.08.2020	13:00	45,33	29,42	69,92	14,56
01.08.2020	14:00	47,20	29,87	73,01	14,08
01.08.2020	15:00	47,53	29,86	73,62	13,66
01.08.2020	16:00	44,33	29,04	69,10	13,44
01.08.2020	17:00	36,45	27,56	56,10	13,53
01.08.2020	18:00	20,63	25,77	19,69	12,86
01.08.2020	19:00	19,00	24,47	17,14	12,50
01.08.2020	20:00	17,90	23,49	15,78	12,46
01.08.2020	21:00	17,07	22,78	14,81	12,16
01.08.2020	22:00	16,21	22,03	13,84	11,93
01.08.2020	23:00	15,40	21,28	12,91	11,96

APÉNDICE C. Datos de variables del microclima a partir de los escenarios de simulación en el software ENVI-met, el día 04 de octubre del 2020.

Tabla. Comportamiento de la Temperatura del aire (Tair) en los escenarios de simulación (Tabla elaborada a partir de datos climáticos arrojados en ENVI-met)

Fecha	Hora (h)	CB Tair (°C)	C1CU Tair (°C)	C2CU Tair (°C)	C3CU Tair (°C)	C4CU Tair (°C)
04.10.2020	01:00	21,98	21,96	21,85	21,75	21,63
04.10.2020	02:00	21,52	21,50	21,40	21,30	20,78
04.10.2020	03:00	21,53	21,51	21,44	21,35	20,80
04.10.2020	04:00	20,57	20,55	20,50	20,42	19,89
04.10.2020	05:00	20,20	20,17	20,14	20,06	19,21
04.10.2020	06:00	20,09	20,07	20,05	19,98	19,23
04.10.2020	07:00	21,67	21,66	21,84	21,77	20,85
04.10.2020	08:00	23,95	23,96	24,60	24,37	23,06
04.10.2020	09:00	25,36	25,38	26,30	25,94	26,15
04.10.2020	10:00	27,22	27,29	28,34	28,02	27,86
04.10.2020	11:00	29,63	29,73	28,83	30,58	30,54
04.10.2020	12:00	30,86	30,96	31,61	31,85	31,62
04.10.2020	13:00	31,66	31,75	32,63	32,68	32,51
04.10.2020	14:00	32,12	32,18	33,09	33,12	33,07
04.10.2020	15:00	31,27	31,27	32,10	32,08	31,86
04.10.2020	16:00	30,25	30,23	30,83	30,79	30,73
04.10.2020	17:00	28,52	28,51	28,78	28,69	28,66
04.10.2020	18:00	27,73	27,72	27,92	27,86	27,61
04.10.2020	19:00	25,59	25,56	25,78	25,63	25,37
04.10.2020	20:00	24,69	24,67	24,88	24,72	24,34
04.10.2020	21:00	24,88	24,87	25,09	24,96	24,66
04.10.2020	22:00	24,22	24,20	24,44	24,28	23,80
04.10.2020	23:00	24,34	24,32	24,55	24,42	24,07

Tabla. Comportamiento de la Humedad Relativa (H.R) en los escenarios de simulación (Tabla elaborada a partir de datos climáticos arrojados en ENVI-met)

Fecha	Hora (h)	CB H.R. (%)	C1CU H.R. (%)	C2CU H.R. (%)	C3CU H.R. (%)	C4CU H.R. (%)
04.10.2020	01:00	60,34	62,72	58,29	59,05	62,16
04.10.2020	02:00	52,73	51,53	48,68	49,22	59,20
04.10.2020	03:00	40,69	42,07	40,40	40,70	42,27
04.10.2020	04:00	50,41	50,80	50,59	50,50	53,74
04.10.2020	05:00	52,93	53,07	53,13	52,99	56,82
04.10.2020	06:00	54,41	54,40	54,53	54,38	58,43
04.10.2020	07:00	39,31	39,75	39,32	39,45	41,82
04.10.2020	08:00	30,62	31,18	30,71	30,80	32,42
04.10.2020	09:00	29,25	29,89	29,49	29,44	28,11
04.10.2020	10:00	27,23	27,72	27,42	27,31	25,14
04.10.2020	11:00	22,23	22,59	21,80	22,21	20,18
04.10.2020	12:00	20,65	20,84	20,87	20,56	19,30
04.10.2020	13:00	21,49	21,57	21,57	21,37	19,62
04.10.2020	14:00	22,05	22,16	22,08	21,96	20,17
04.10.2020	15:00	26,24	26,35	26,26	26,17	23,92
04.10.2020	16:00	27,62	28,01	27,66	27,72	25,12
04.10.2020	17:00	37,72	38,23	37,86	37,86	39,21
04.10.2020	18:00	41,46	42,03	41,54	41,53	44,68
04.10.2020	19:00	51,48	52,18	51,81	51,66	54,00
04.10.2020	20:00	52,59	53,39	52,84	52,76	54,09
04.10.2020	21:00	35,25	35,91	34,99	35,16	34,65
04.10.2020	22:00	32,97	33,52	32,76	32,89	33,75
04.10.2020	23:00	31,35	31,14	30,36	30,52	32,51

Tabla. Análisis de Temperatura Media Radiante

Fecha	Hora (h)	CB Tmrt (°C)	C1CU Tmrt (°C)	C2CU Tmrt (°C)	C3CU Tmrt (°C)	C4CU Tmrt (°C)
04.10.2020	01:00	12,75	12,80	12,93	13,71	12,30
04.10.2020	02:00	12,31	12,38	12,48	13,30	11,35
04.10.2020	03:00	12,29	12,35	12,49	13,30	11,42
04.10.2020	04:00	11,39	11,46	11,54	12,39	10,36
04.10.2020	05:00	10,96	11,02	11,10	11,96	9,56
04.10.2020	06:00	10,80	10,86	10,96	11,82	9,60
04.10.2020	07:00	46,03	45,98	46,13	41,56	17,68
04.10.2020	08:00	27,40	27,27	59,25	55,06	26,63
04.10.2020	09:00	34,52	34,40	64,55	61,88	35,35
04.10.2020	10:00	40,21	40,11	67,13	64,27	40,94
04.10.2020	11:00	44,71	44,62	67,85	66,52	70,46
04.10.2020	12:00	46,74	46,67	70,45	68,20	71,67
04.10.2020	13:00	46,58	46,50	71,75	69,26	72,79
04.10.2020	14:00	44,70	44,59	71,87	69,29	72,82
04.10.2020	15:00	68,14	39,63	67,73	65,27	68,32
04.10.2020	16:00	58,07	57,97	57,70	55,76	58,42
04.10.2020	17:00	23,50	23,49	23,17	23,36	22,98
04.10.2020	18:00	20,92	20,96	21,01	21,61	20,66
04.10.2020	19:00	18,28	18,34	18,34	19,05	17,62
04.10.2020	20:00	16,97	17,03	17,08	17,81	16,22
04.10.2020	21:00	16,88	16,94	17,09	17,80	16,52
04.10.2020	22:00	16,10	16,16	16,29	17,04	15,41
04.10.2020	23:00	16,08	16,14	16,32	17,05	15,72

Tabla. Análisis de la Velocidad del Viento

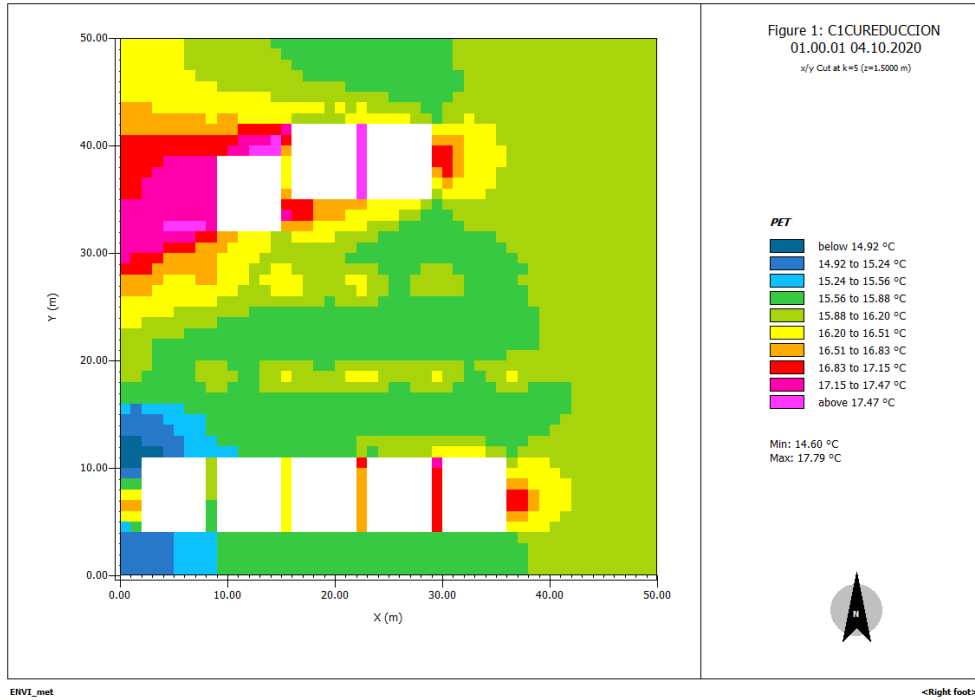
Fecha	Hora (h)	CB Wind.S. (m/s)	C1CU Wind.S (m/s)	C2CU Wind.S (m/s)	C3CU Wind.S (m/s)	C4CU Wind.S. (m/s)
04.10.2020	01:00	1,28	1,38	1,69	1,28	1,04
04.10.2020	02:00	1,28	1,35	1,53	1,26	1,03
04.10.2020	03:00	1,28	1,34	1,52	1,20	1,02
04.10.2020	04:00	1,27	1,34	1,52	1,19	1,00
04.10.2020	05:00	1,27	1,34	1,52	1,18	0,99
04.10.2020	06:00	1,27	1,33	1,51	1,18	0,98
04.10.2020	07:00	1,26	1,33	1,51	1,17	0,97
04.10.2020	08:00	1,25	1,32	1,49	1,15	0,94
04.10.2020	09:00	1,27	1,34	1,53	1,19	1,02
04.10.2020	10:00	1,33	1,40	1,63	1,29	1,06
04.10.2020	11:00	1,35	1,42	1,65	1,33	1,06
04.10.2020	12:00	1,37	1,43	1,67	1,34	1,05
04.10.2020	13:00	1,38	1,44	1,68	1,36	1,05
04.10.2020	14:00	1,39	1,45	1,69	1,37	1,05
04.10.2020	15:00	1,40	1,47	1,70	1,39	1,06
04.10.2020	16:00	1,42	1,48	1,73	1,41	1,08
04.10.2020	17:00	1,44	1,50	1,75	1,43	1,09
04.10.2020	18:00	1,46	1,52	1,77	1,45	1,09
04.10.2020	19:00	1,45	1,51	1,76	1,43	1,08
04.10.2020	20:00	1,45	1,51	1,75	1,42	1,07
04.10.2020	21:00	1,46	1,51	1,75	1,42	1,06
04.10.2020	22:00	1,46	1,52	1,76	1,42	1,06
04.10.2020	23:00	1,47	1,52	1,76	1,42	1,06

Tabla. Análisis horario de PET

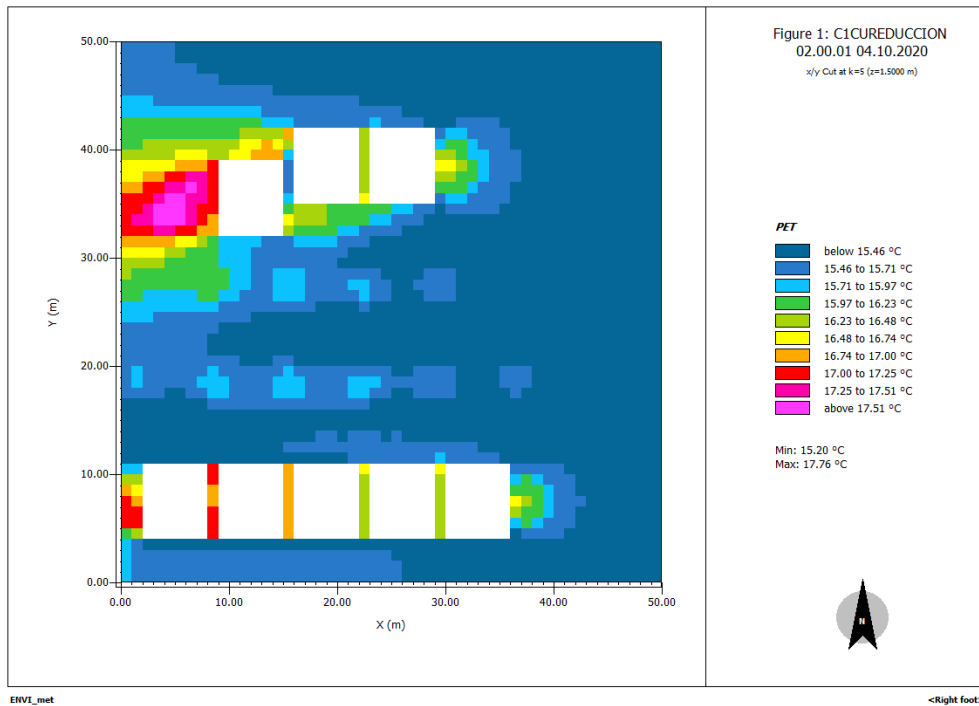
Date	Time	CB (° C)	C1CU (° C)	C2CU (° C)	C3CU (° C)	C4CU (° C)
04.10.2020	01.00.01	16,01	16,00	15,80	16,20	15,80
04.10.2020	02.00.01	15,60	15,42	15,40	15,60	14,85
04.10.2020	03.00.01	15,60	15,40	15,40	15,60	14,80
04.10.2020	04.00.01	14,60	14,60	14,40	14,80	14,00
04.10.2020	05.00.01	14,20	14,20	14,00	14,40	13,24
04.10.2020	06.00.01	14,00	14,00	14,00	14,23	13,29
04.10.2020	07.00.01	27,00	26,60	26,20	25,40	16,80
04.10.2020	08.00.01	21,80	21,60	35,07	34,08	21,40
04.10.2020	09.00.01	25,20	25,20	39,23	38,83	27,00
04.10.2020	10.00.01	29,40	29,20	42,21	41,57	30,76
04.10.2020	11.00.01	33,40	33,33	42,90	44,86	47,81
04.10.2020	12.00.01	35,43	35,38	46,87	46,79	48,62
04.10.2020	13.00.01	36,12	36,06	48,50	48,08	48,83
04.10.2020	14.00.01	35,72	35,65	48,58	48,47	48,91
04.10.2020	15.00.01	46,19	32,70	45,99	45,49	47,78
04.10.2020	16.00.01	40,14	39,92	39,84	39,54	41,60
04.10.2020	17.00.01	24,00	23,80	23,80	24,00	24,20
04.10.2020	18.00.01	22,60	22,60	22,60	22,81	22,61
04.10.2020	19.00.01	20,20	20,20	20,20	20,40	20,05
04.10.2020	20.00.01	19,20	19,02	19,20	19,40	18,85
04.10.2020	21.00.01	19,20	19,20	19,20	19,60	19,20
04.10.2020	22.00.01	18,60	18,40	18,60	18,80	18,20
04.10.2020	23.00.01	18,60	18,60	18,60	19,00	18,60

APÉNDICE D. Mapas horarios PET en el escenario C1CU (04 de octubre)

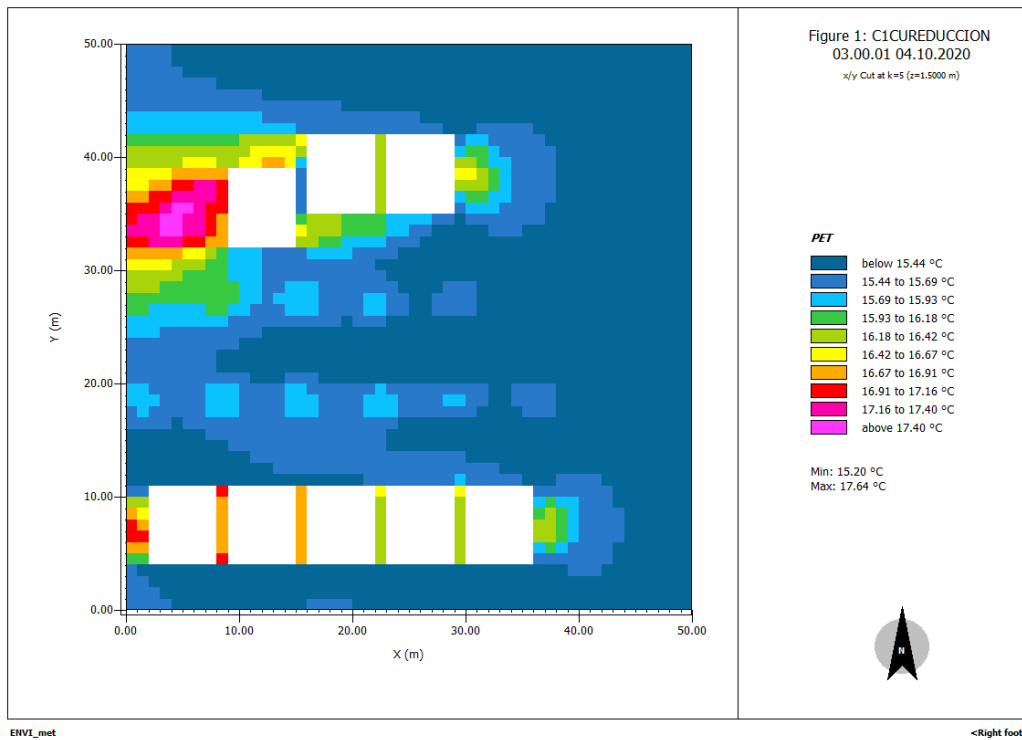
04 de octubre del 2020 a las 01 h 00



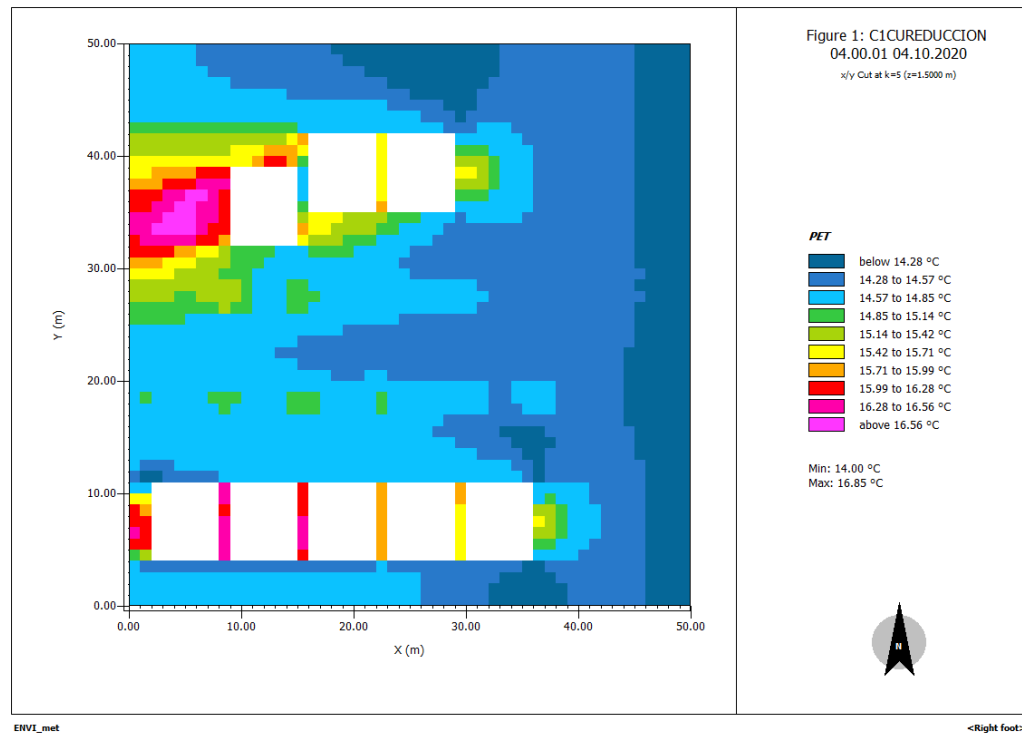
04 de octubre del 2020 a las 02 h 00



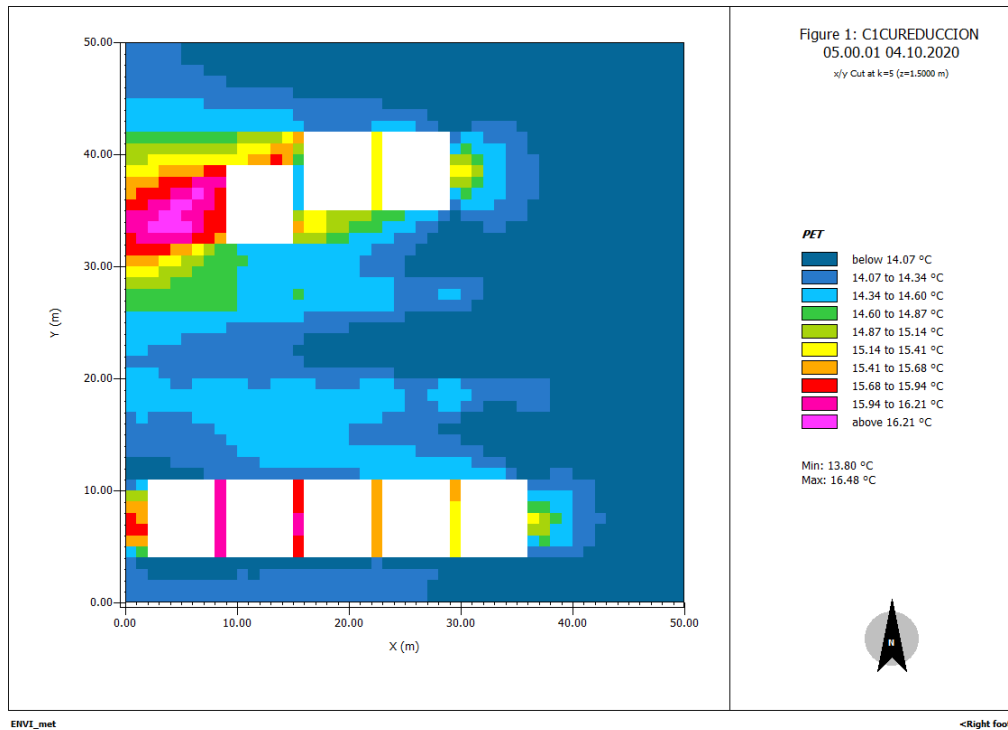
04 de octubre del 2020 a las 03 h 00



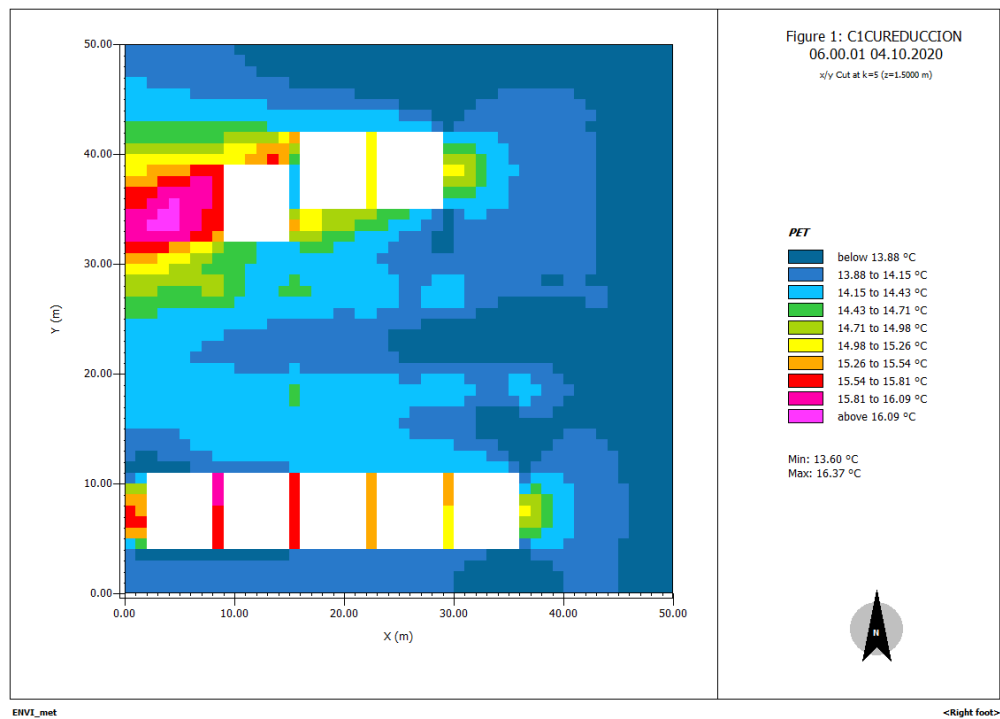
04 de octubre del 2020 a las 04 h 00



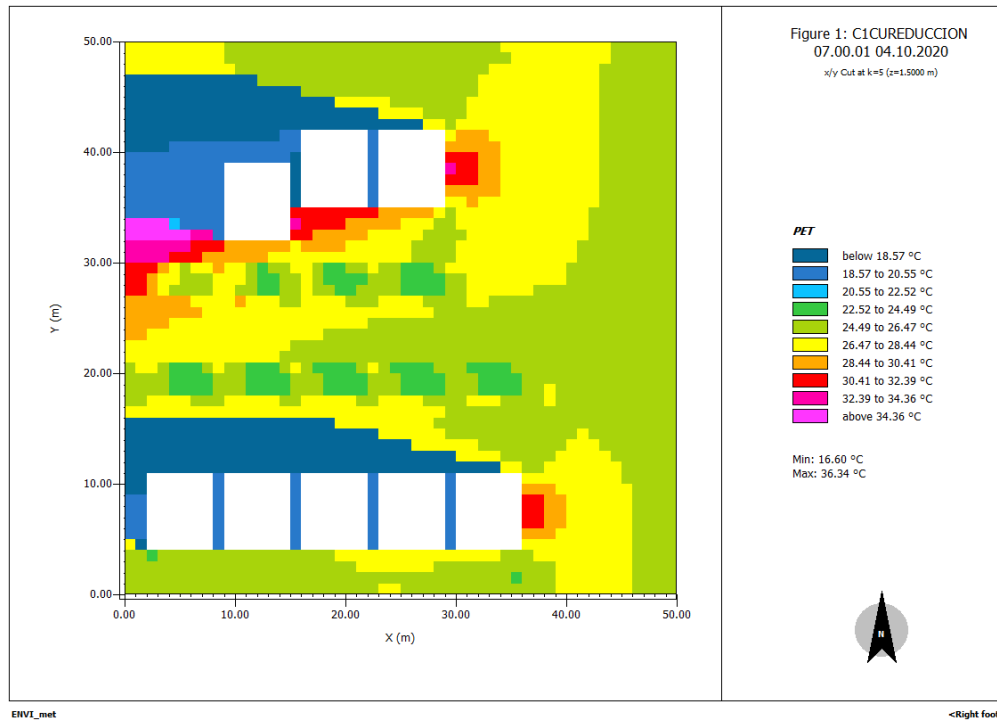
04 de octubre del 2020 a las 05 h 00



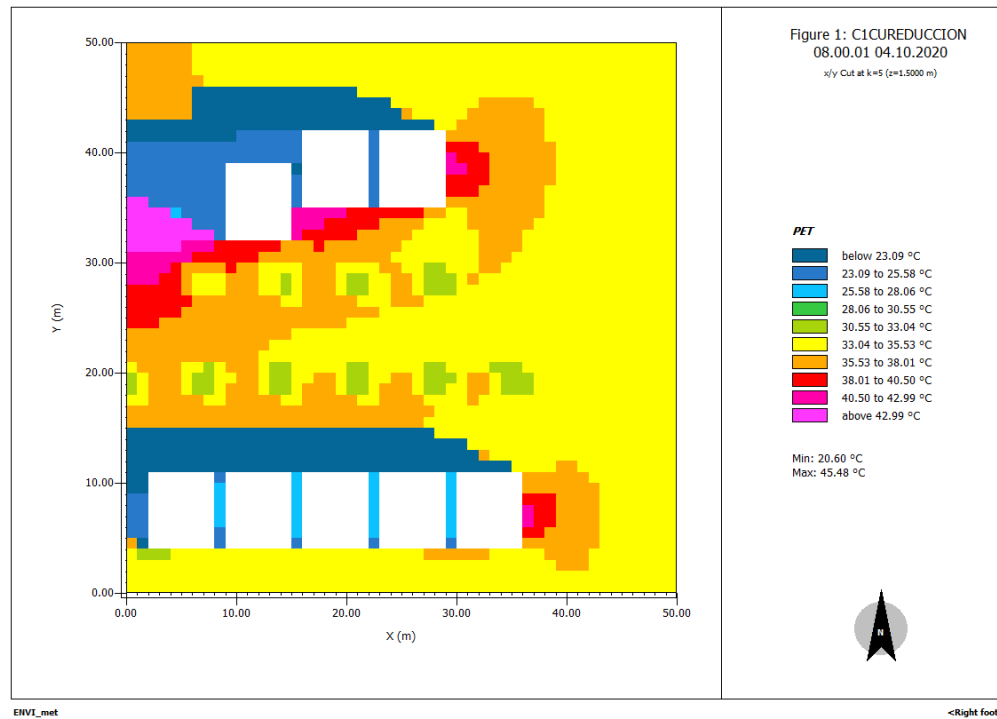
04 de octubre del 2020 a las 06 h 00



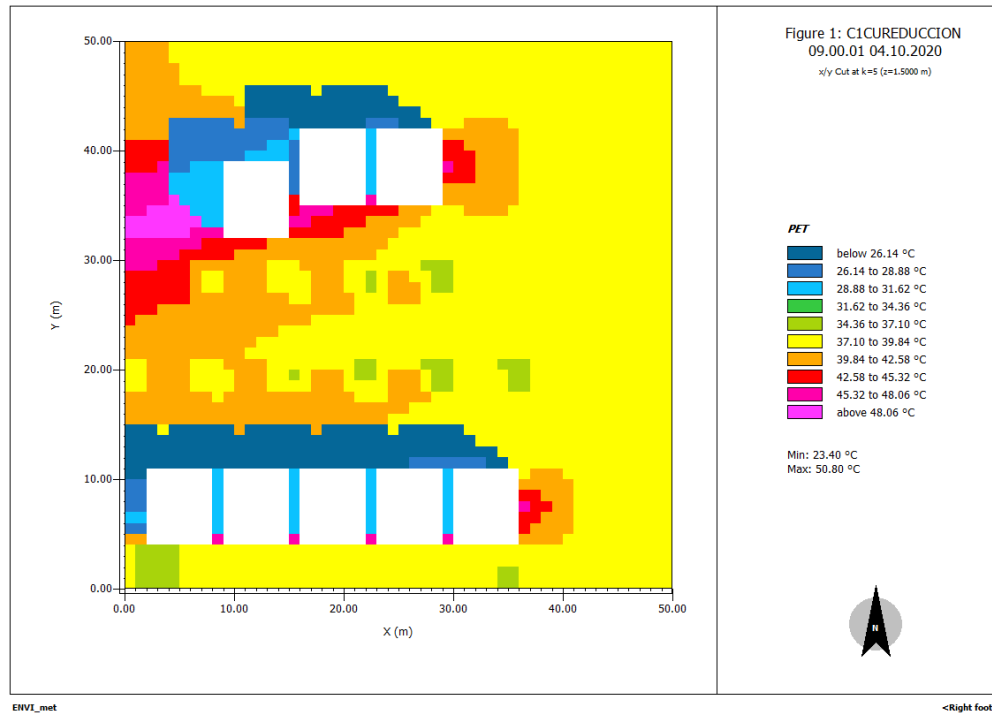
04 de octubre del 2020 a las 07 h 00



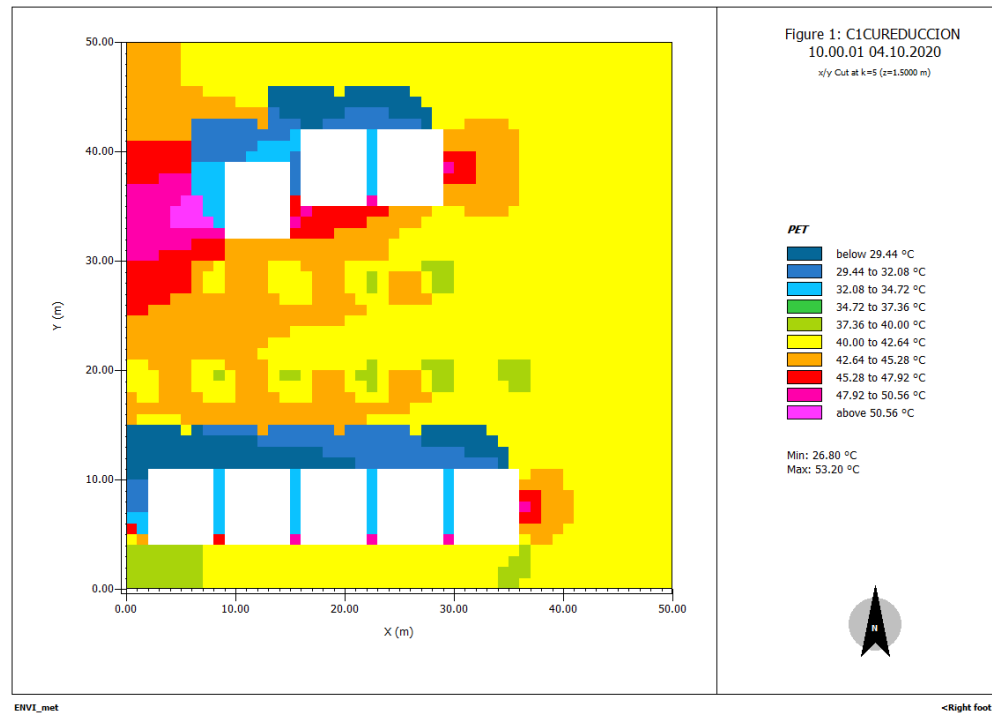
04 de octubre del 2020 a las 08 h 00



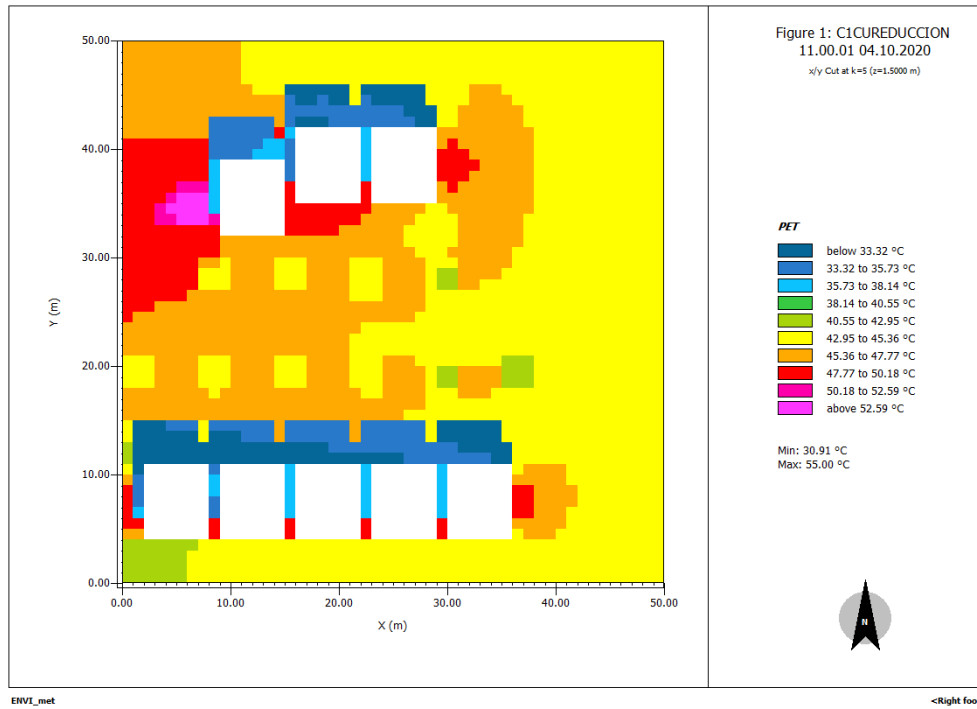
04 de octubre del 2020 a las 09 h 00



04 de octubre del 2020 a las 10 h 00



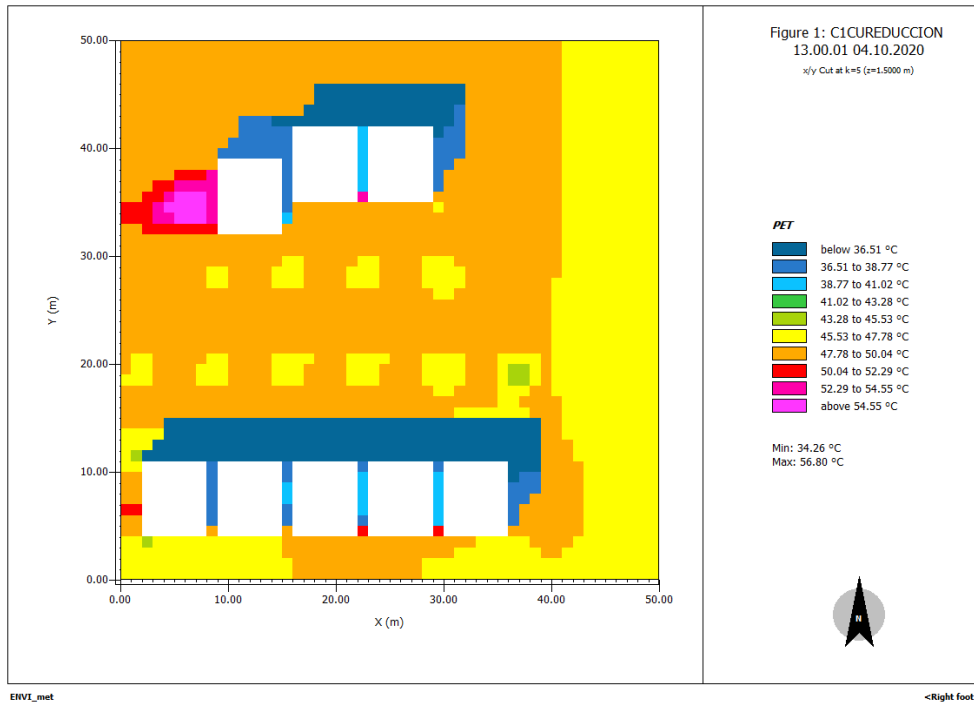
04 de octubre del 2020 a las 11 h 00



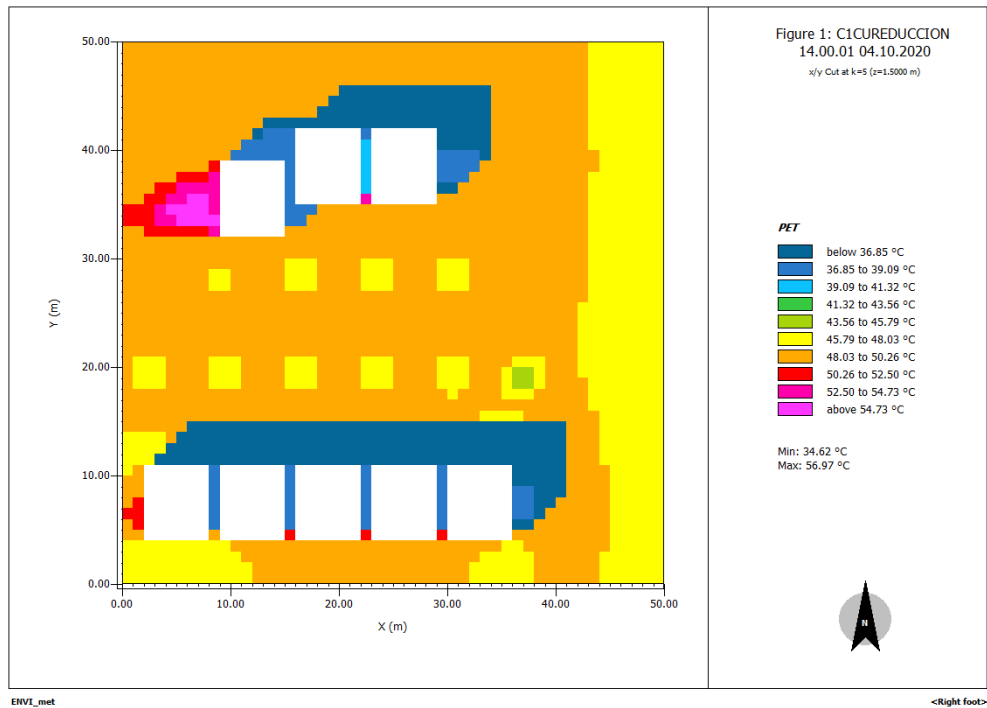
04 de octubre del 2020 a las 12 h 00



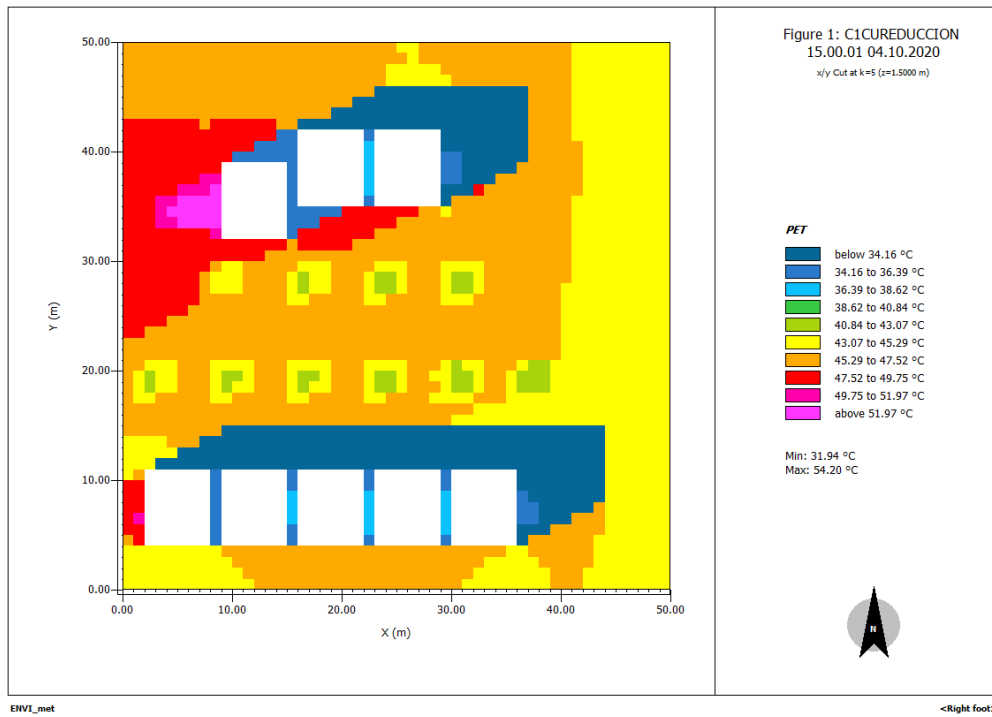
04 de octubre del 2020 a las 13 h 00



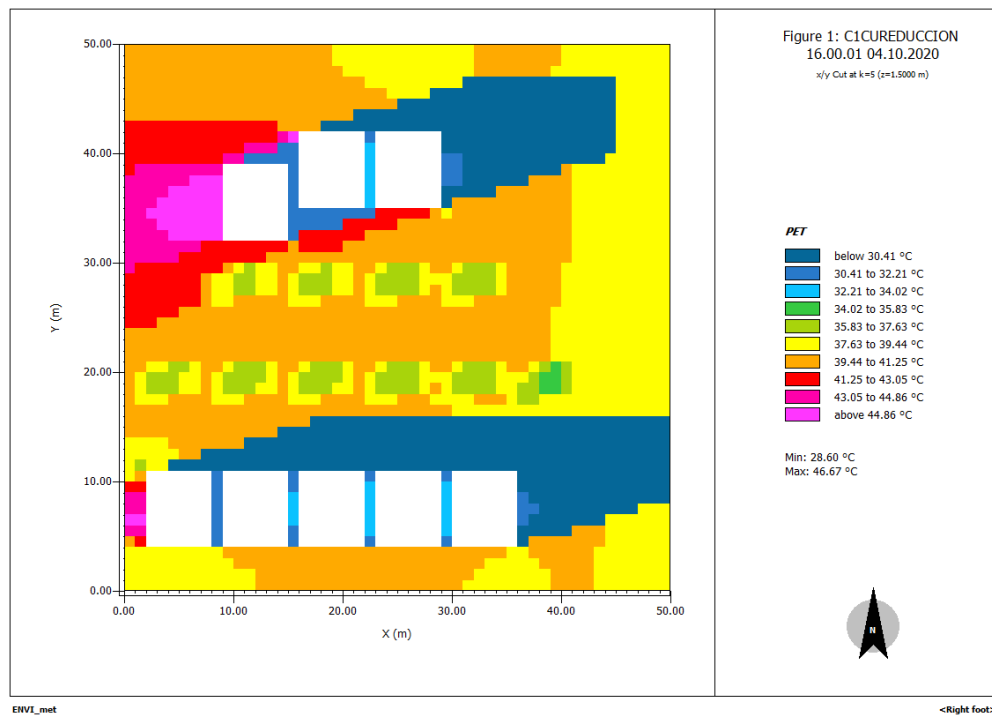
04 de octubre del 2020 a las 14 h 00



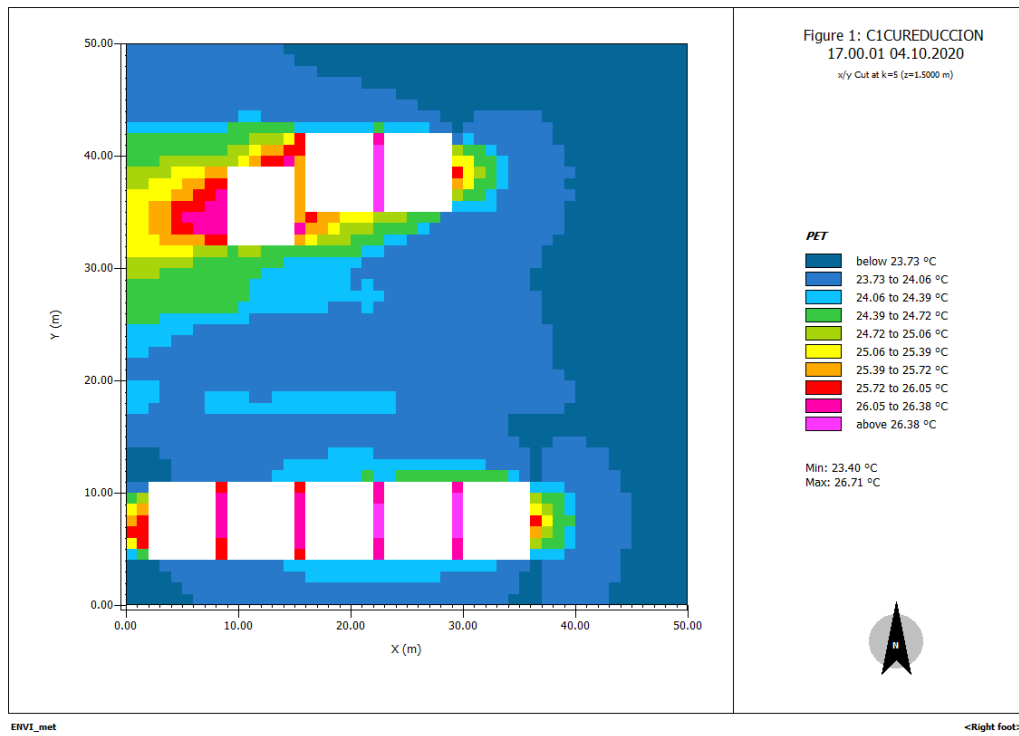
04 de octubre del 2020 a las 15 h 00



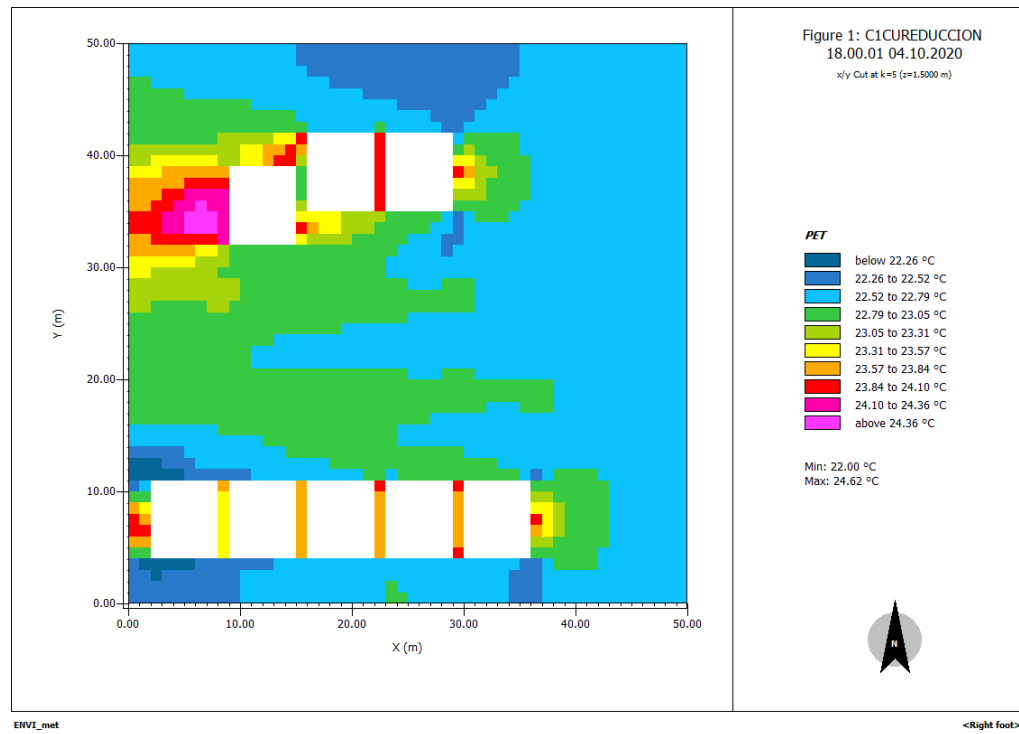
04 de octubre del 2020 a las 16 h 00



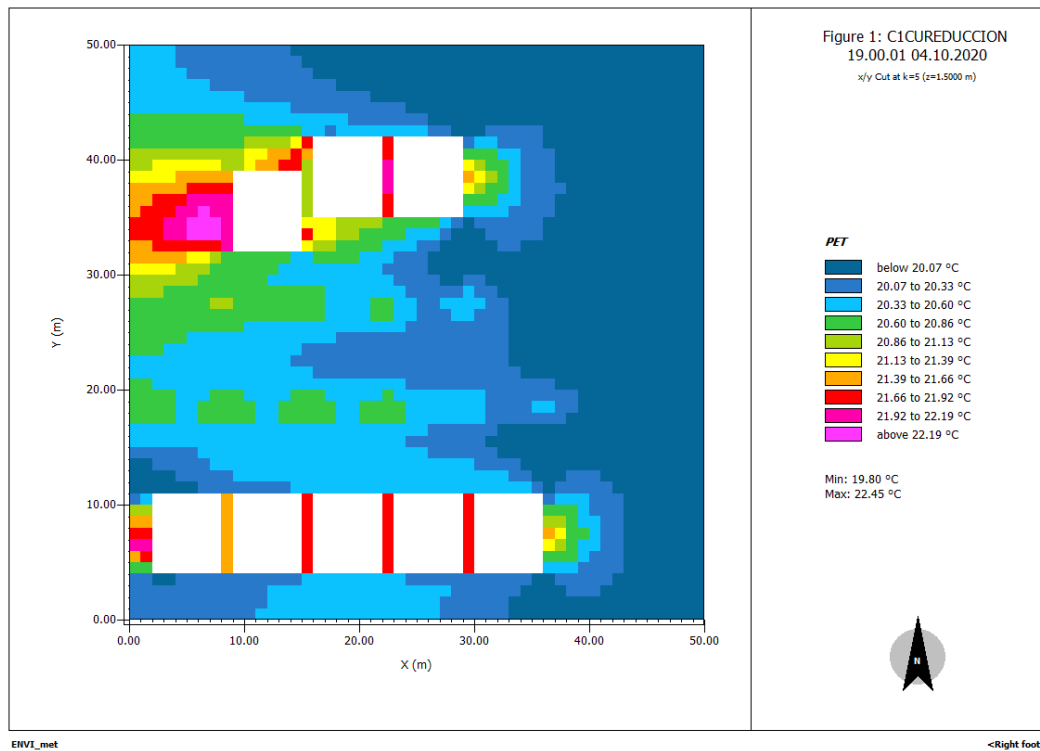
04 de octubre del 2020 a las 17 h 00



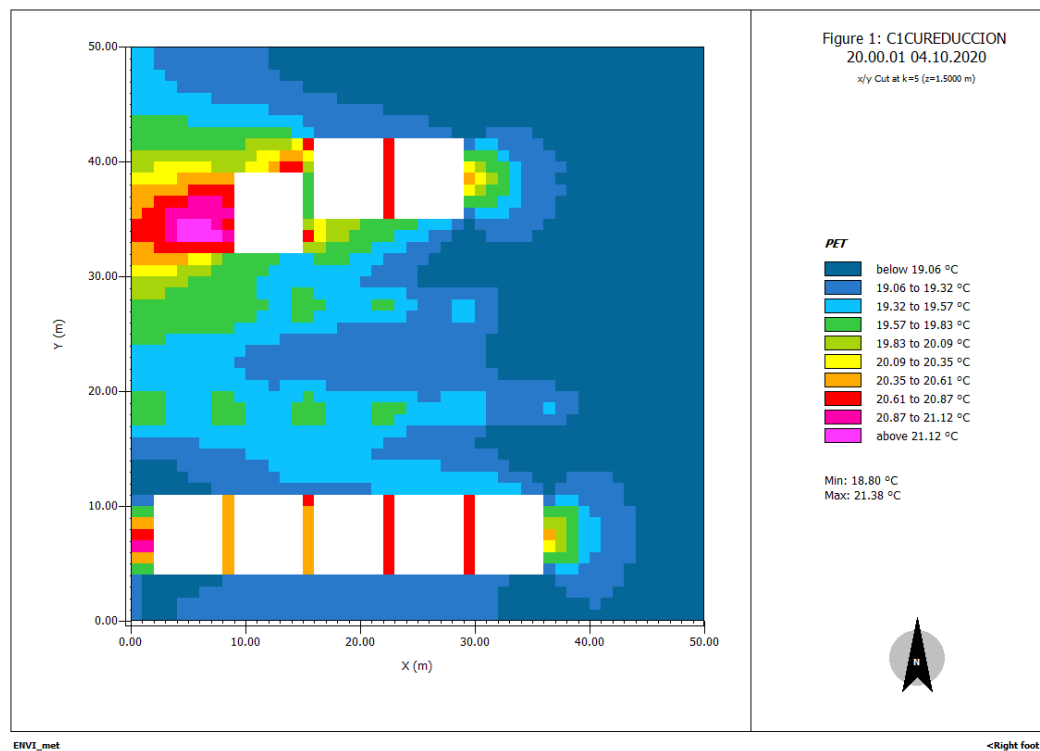
04 de octubre del 2020 a las 18 h 00



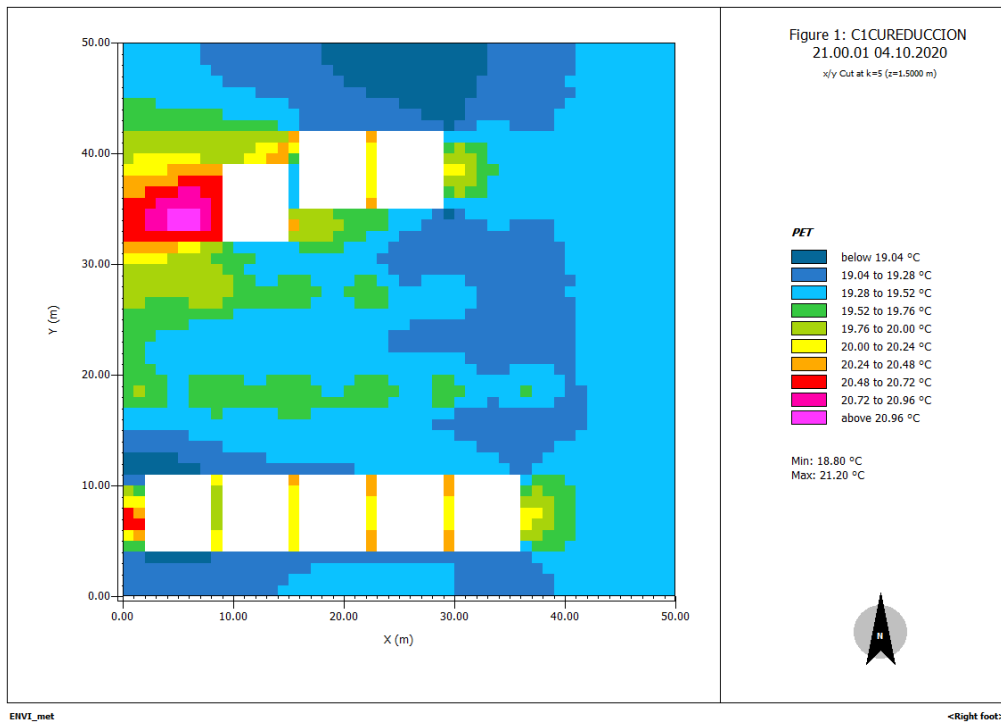
04 de octubre del 2020 a las 19 h 00



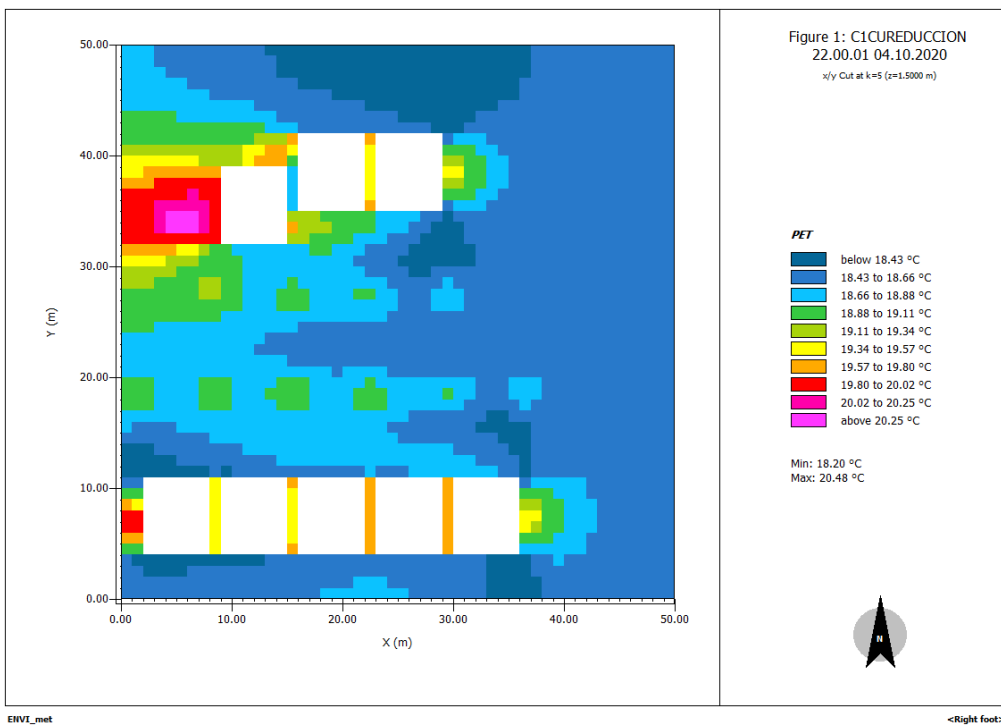
04 de octubre del 2020 a las 20 h 00



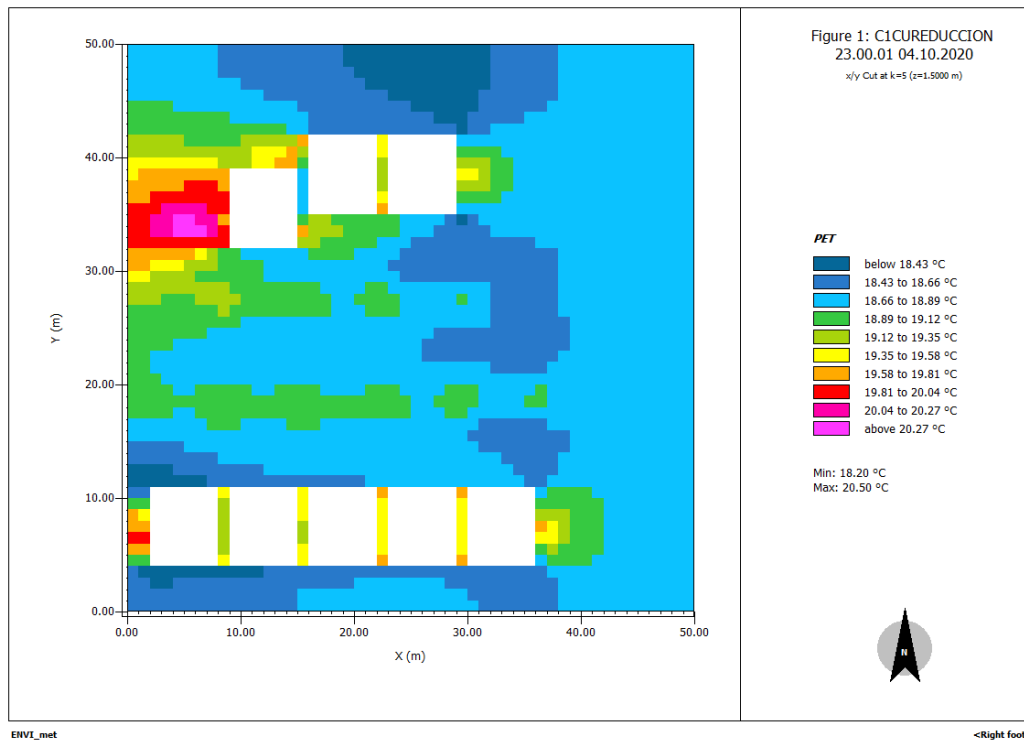
04 de octubre del 2020 a las 21 h 00



04 de octubre del 2020 a las 22 h 00

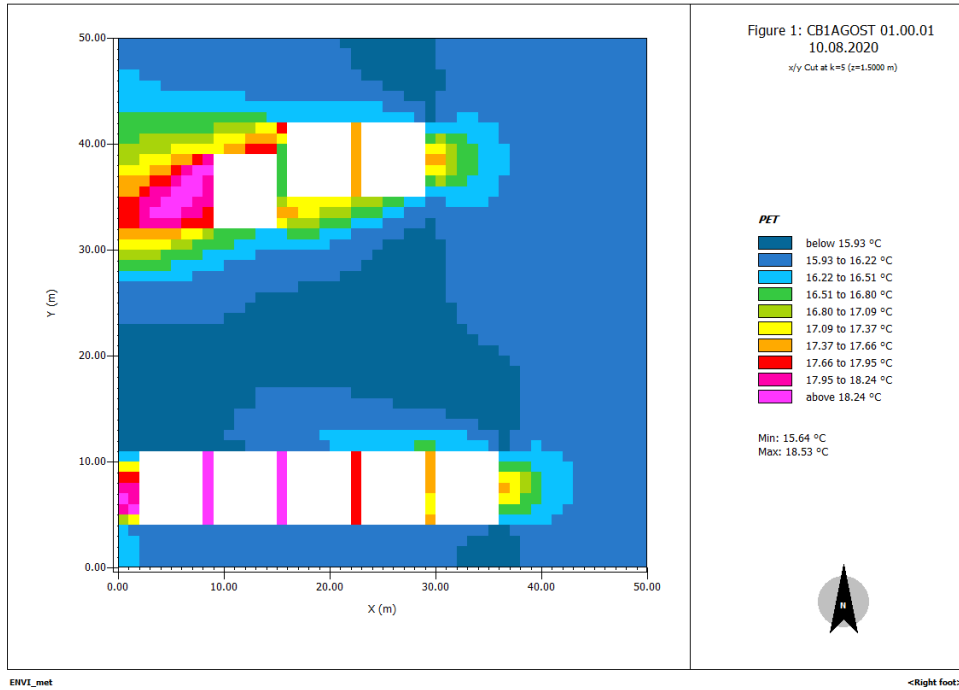


04 de octubre del 2020 a las 23 h 00

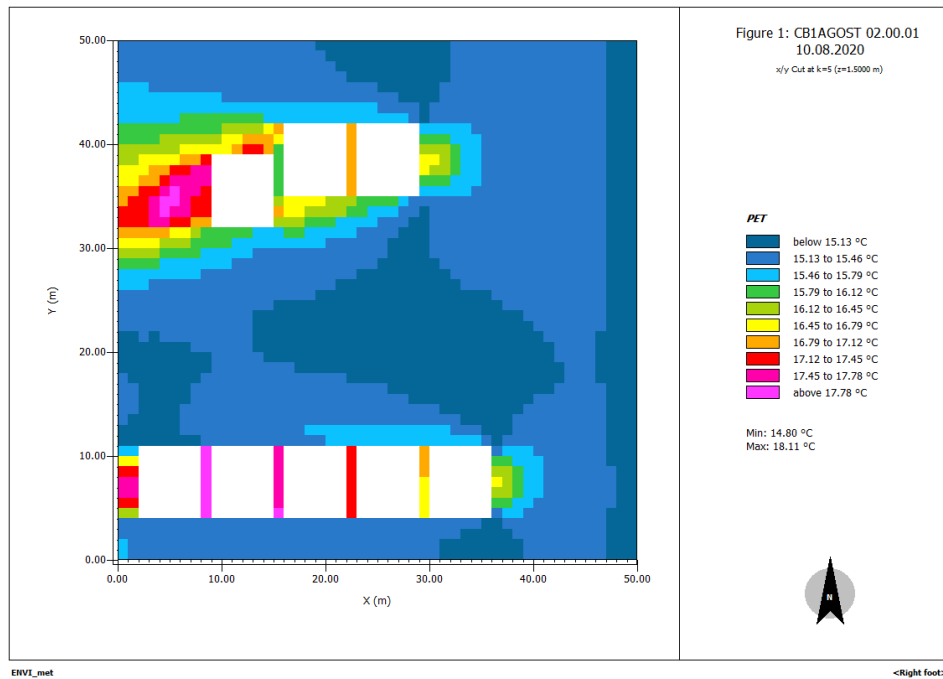


APÉNDICE E. Mapas horarios del PET con el día típico en CB (01 de agosto)

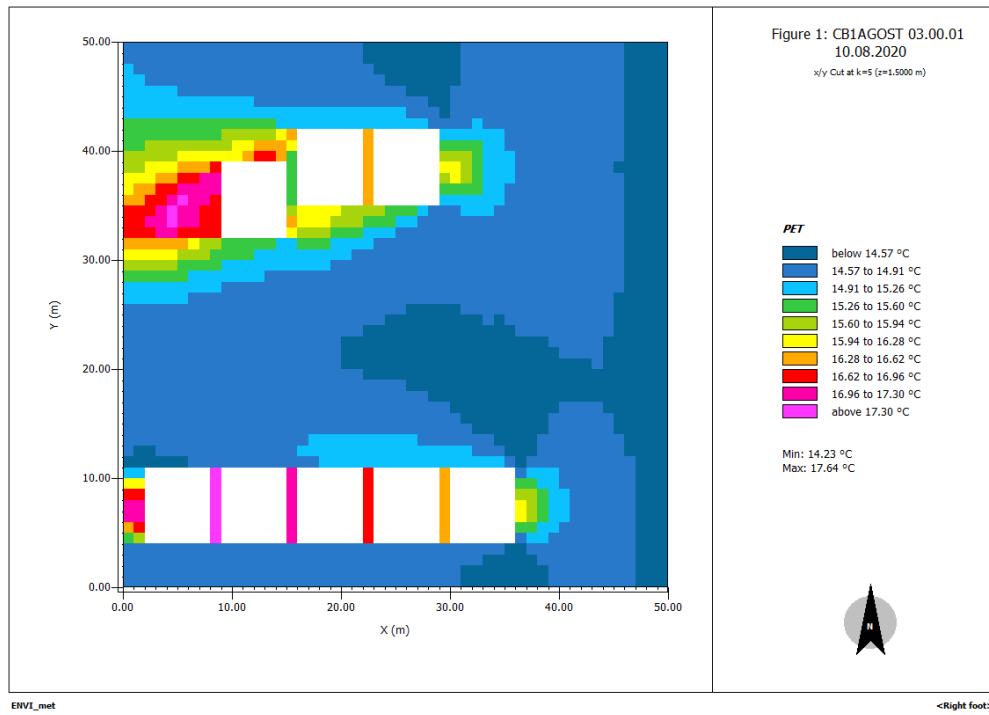
01 de agosto a las 01 h 00



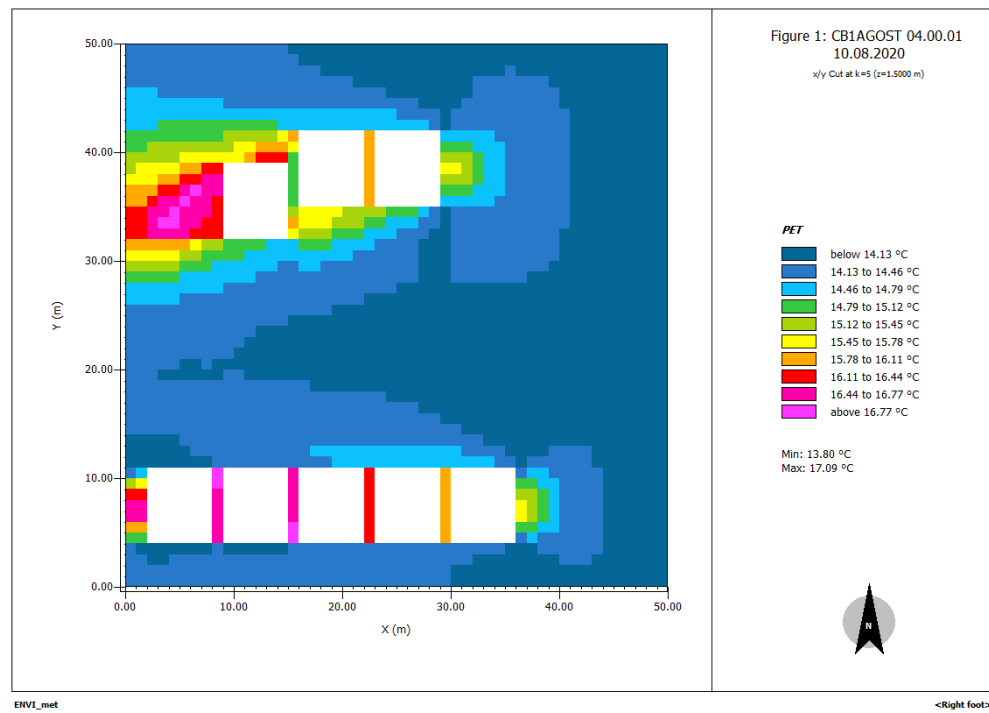
01 de agosto a las 02 h 00



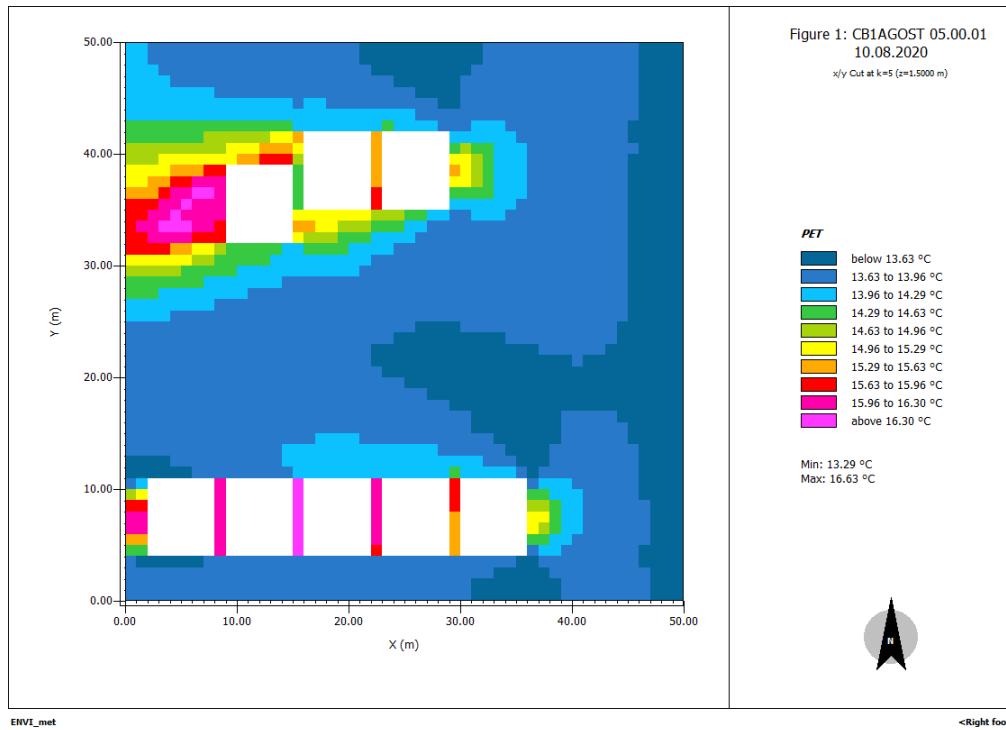
01 de agosto a las 03 h 00



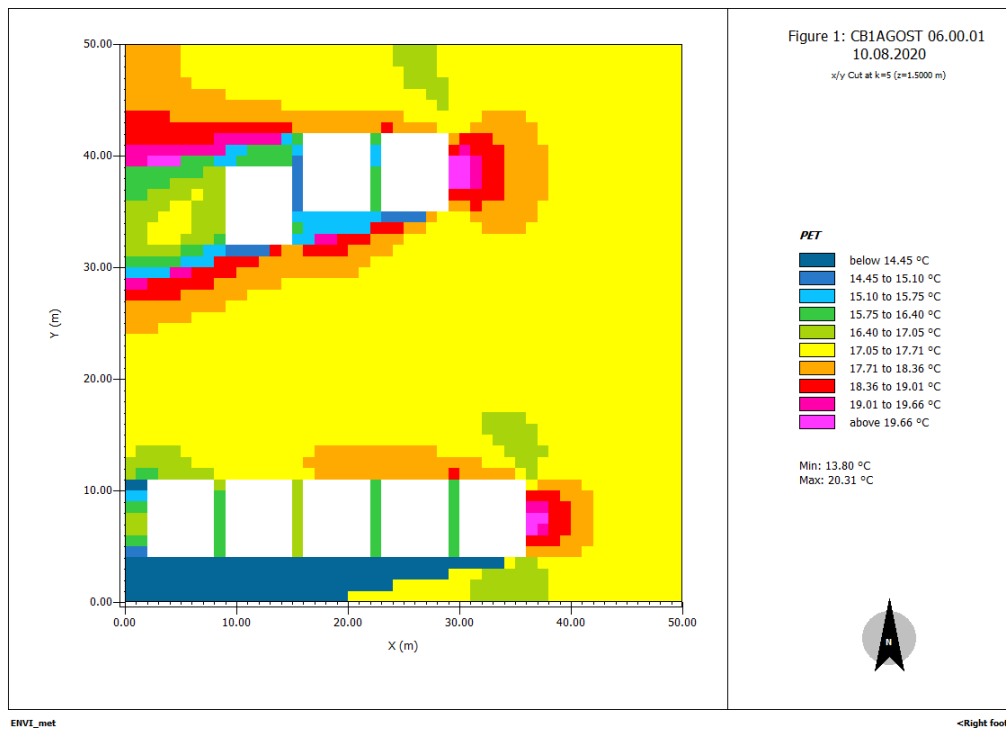
01 de agosto a las 04 h 00



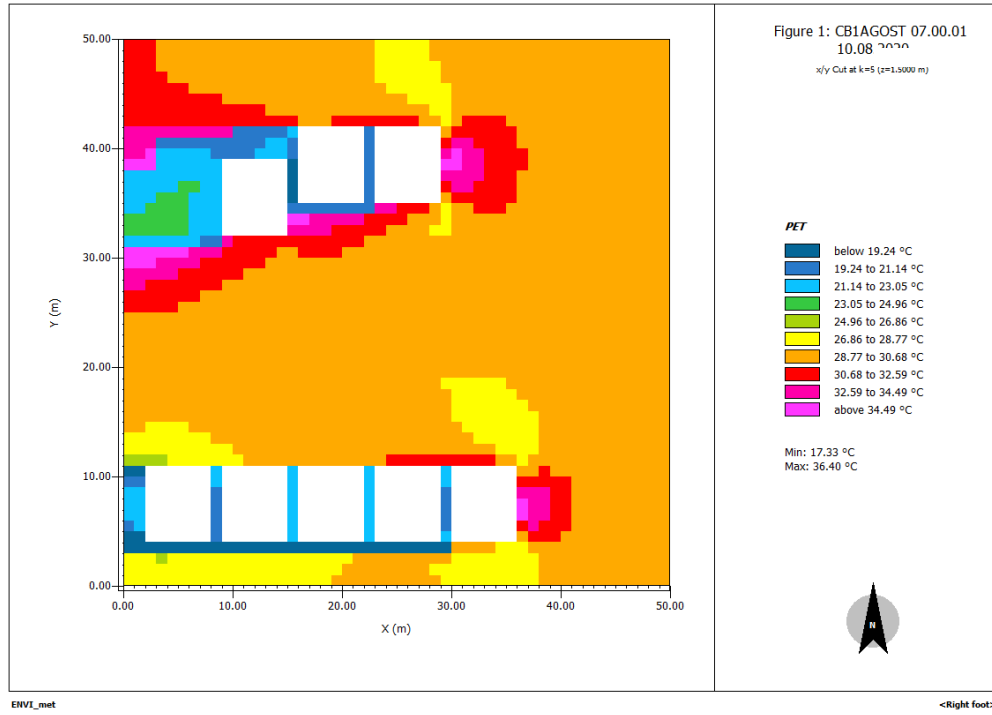
01 de agosto a las 05 h 00



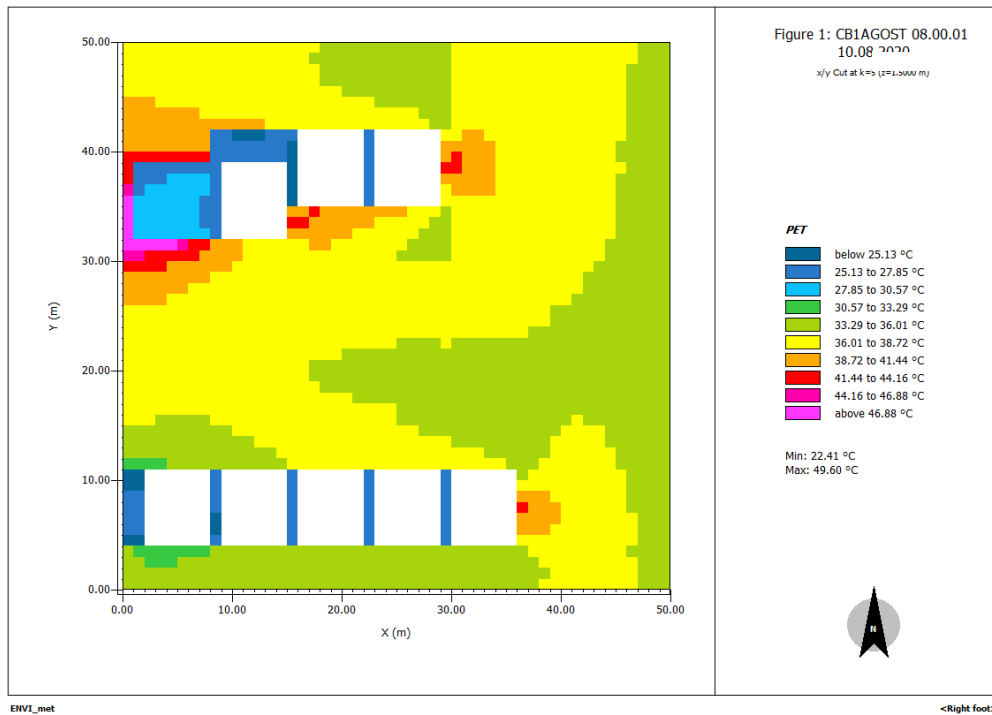
01 de agosto a las 06 h 00



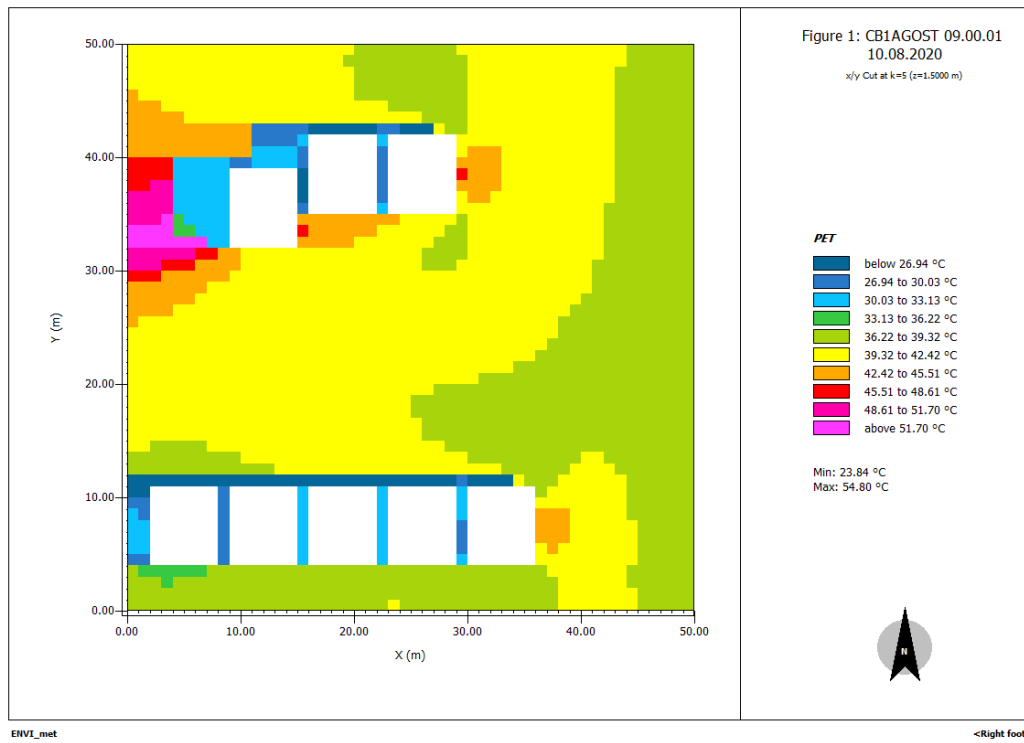
01 de agosto a las 07 h 00



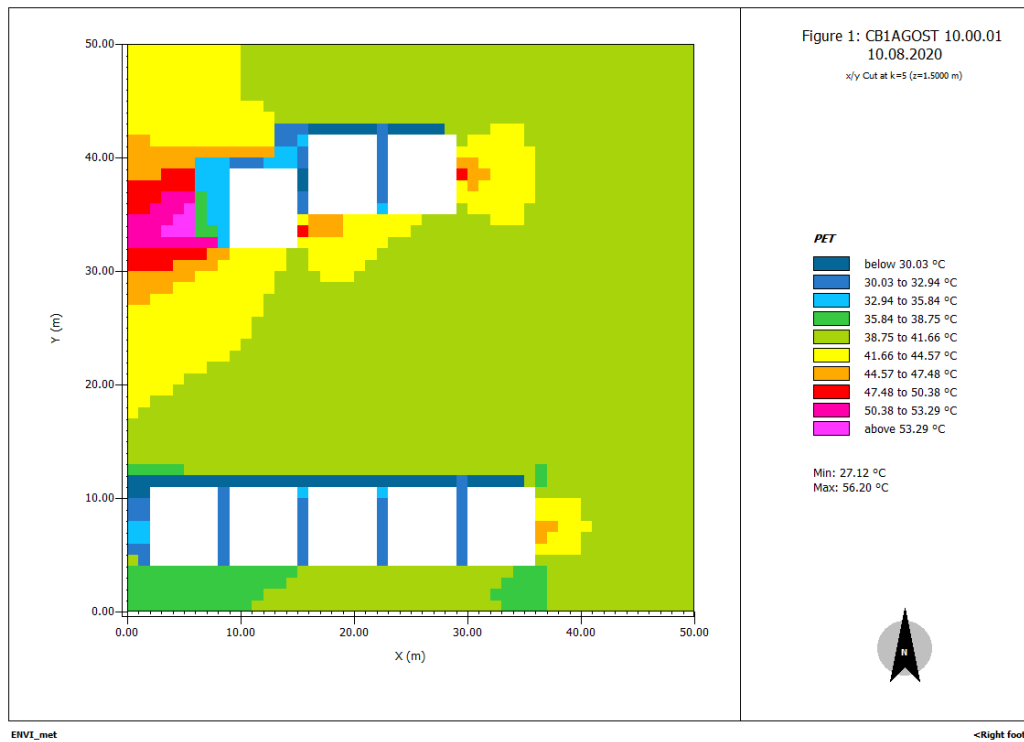
01 de agosto a las 08 h 00



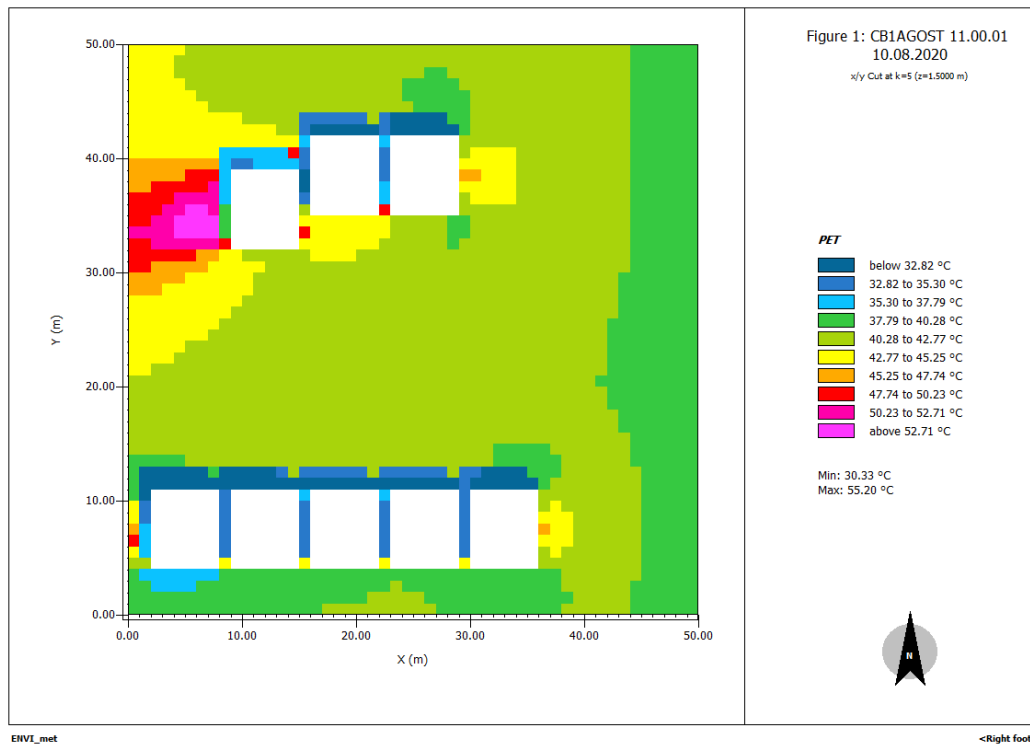
01 de agosto a las 09 h 00



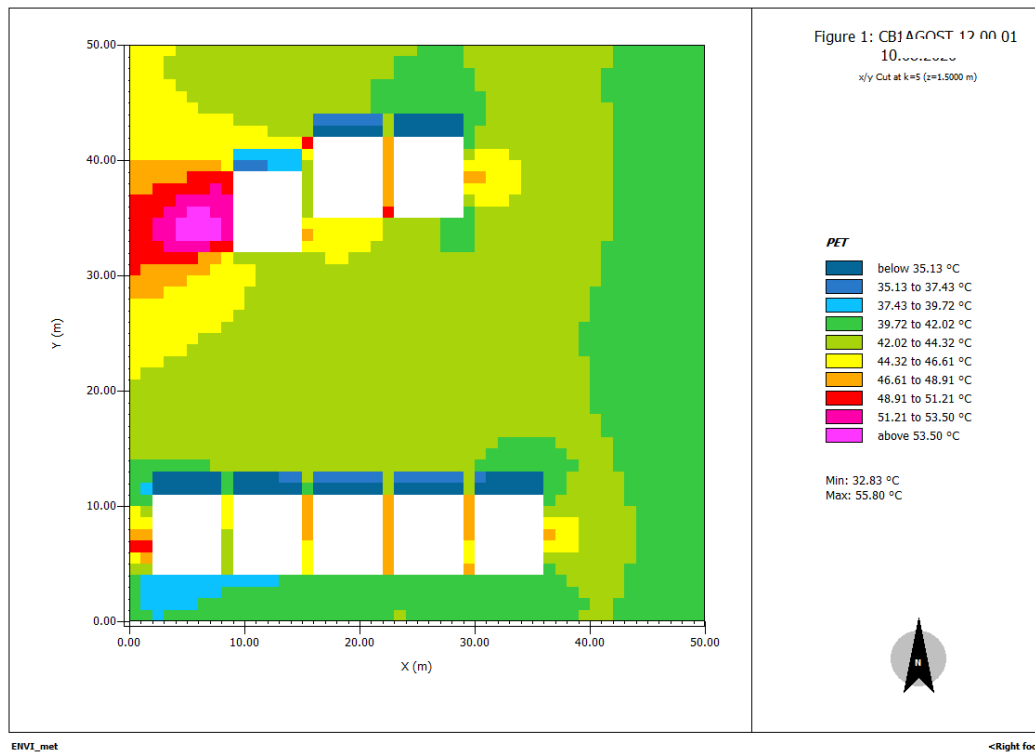
01 de agosto a las 10 h 00



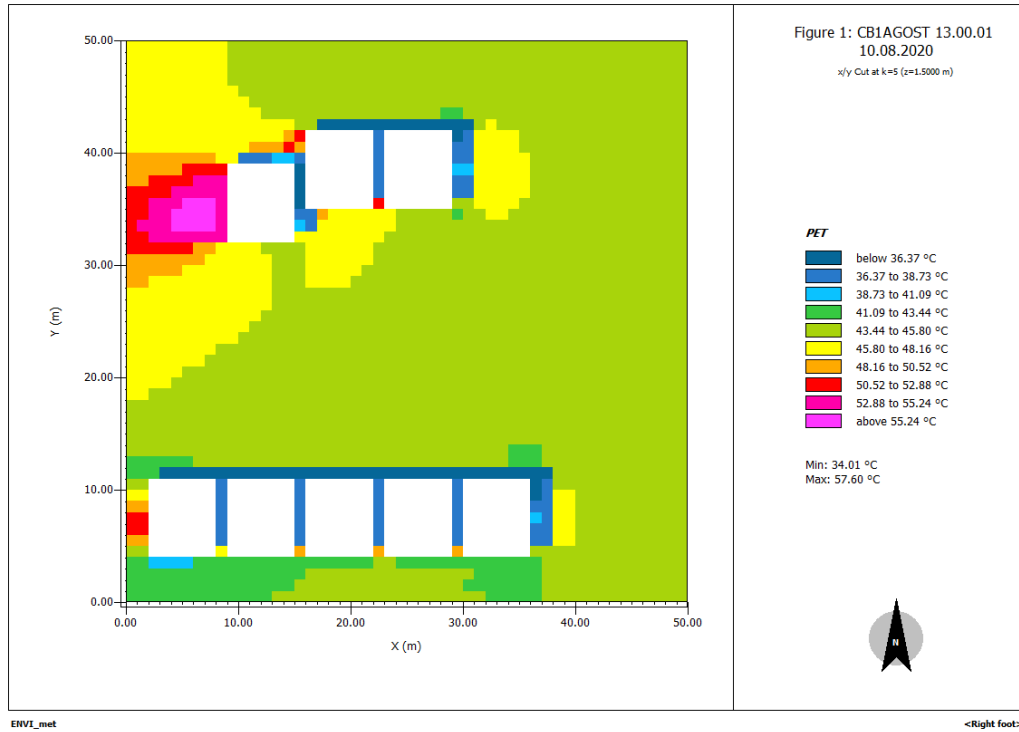
01 de agosto a las 11 h 00



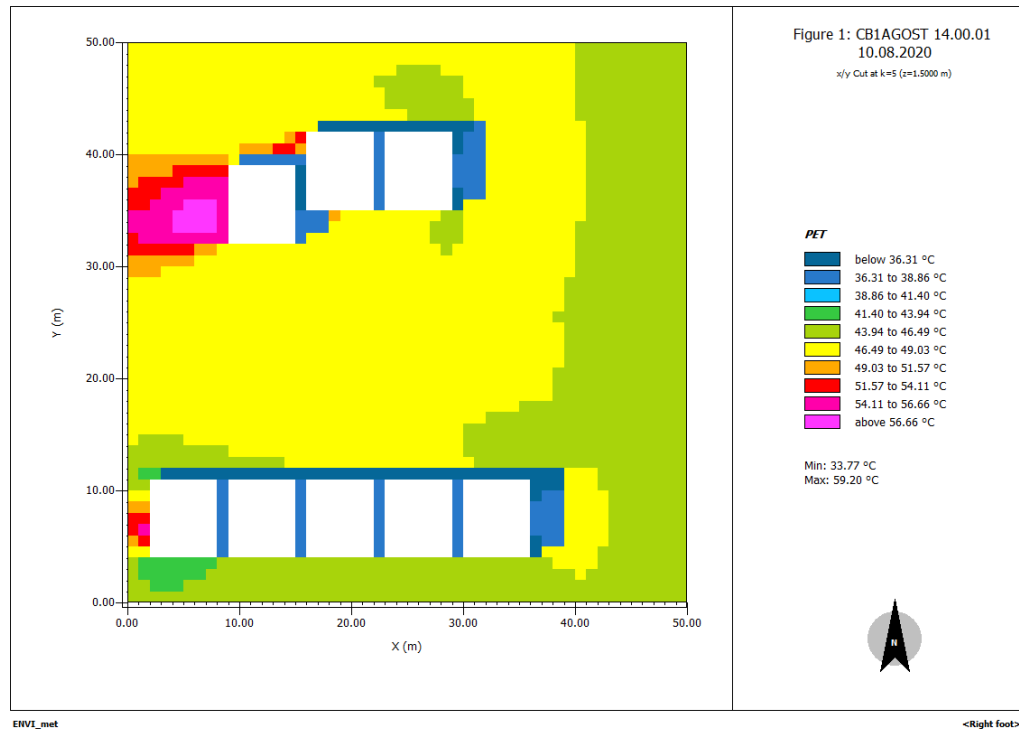
01 de agosto a las 12 h 00



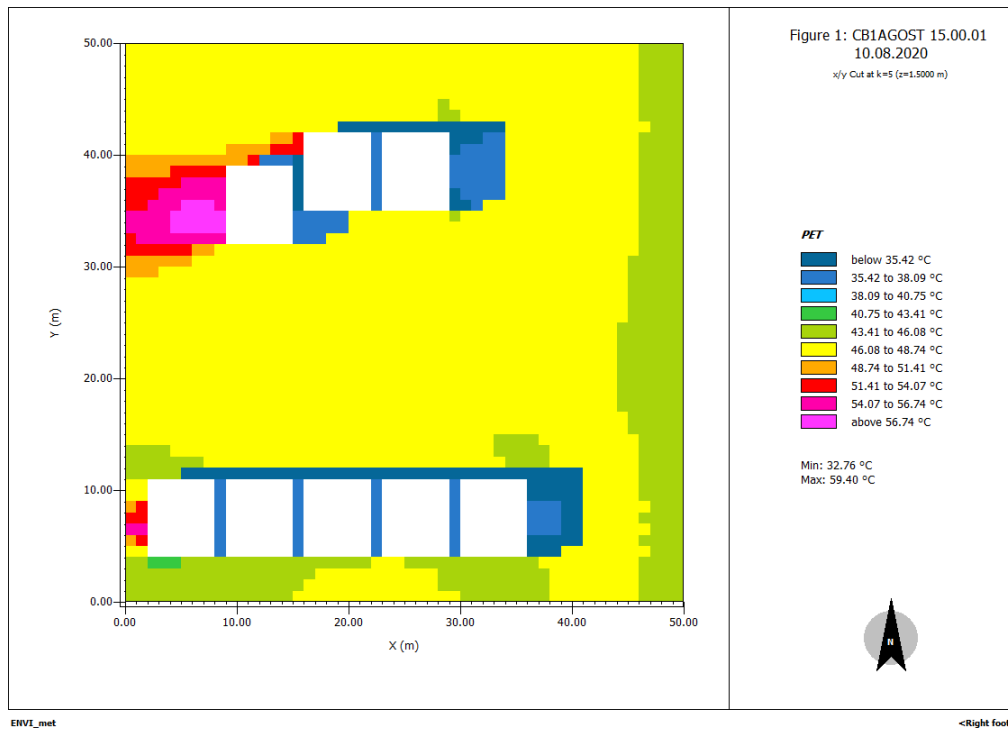
01 de agosto a las 13 h 00



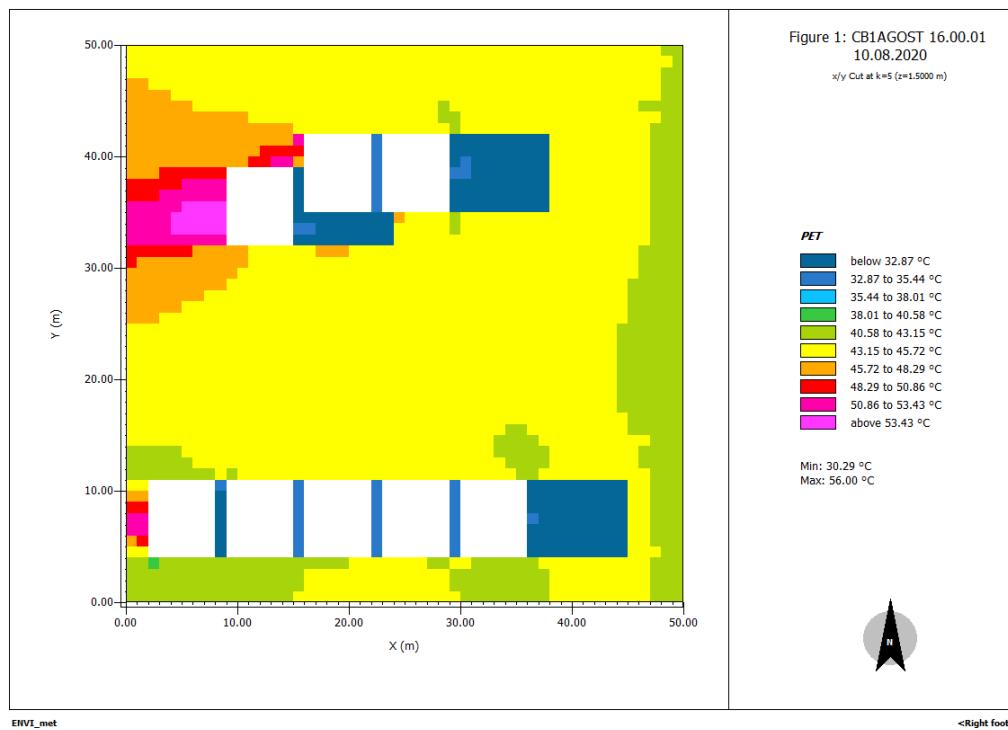
01 de agosto a las 14 h 00



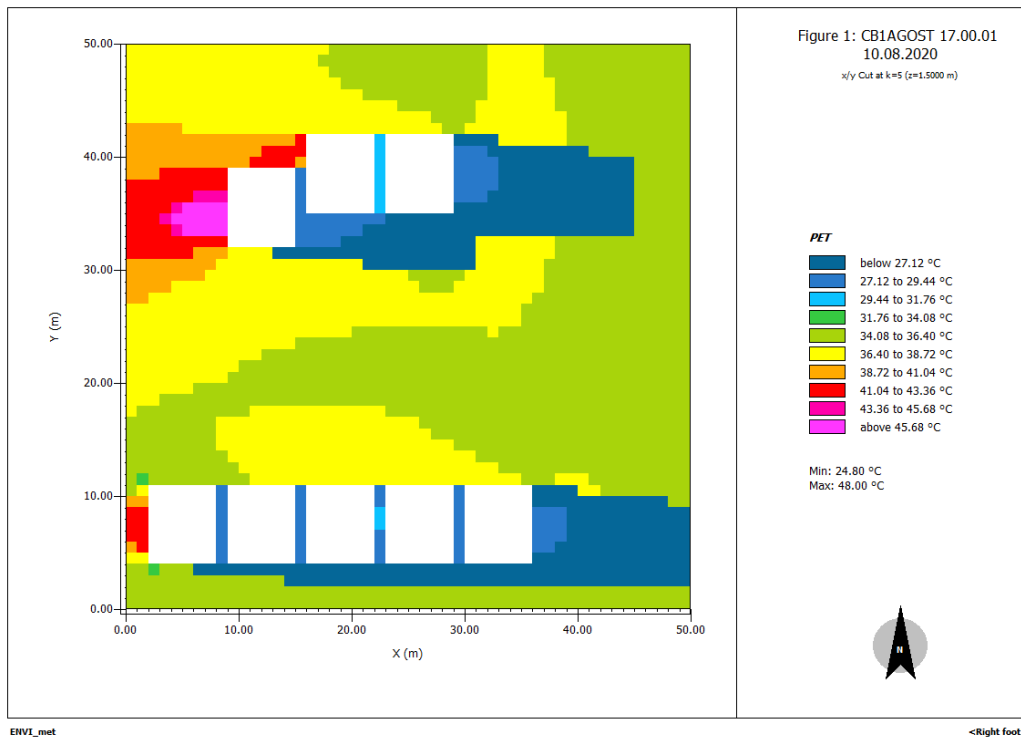
01 de agosto a las 15 h 00



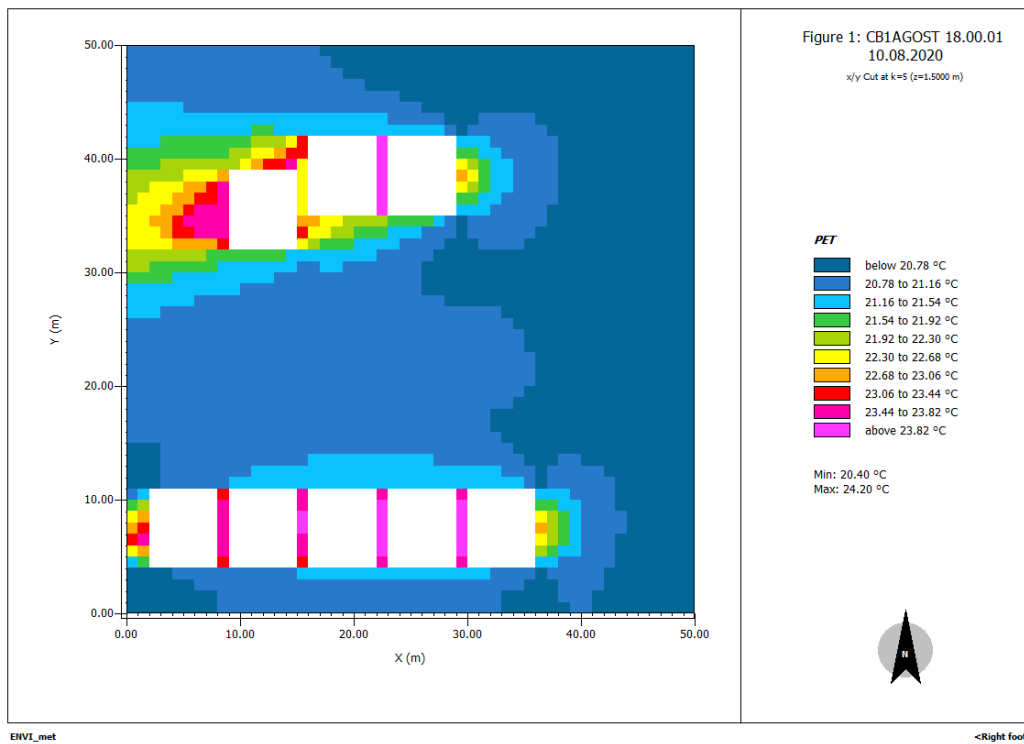
01 de agosto a las 16 h 00



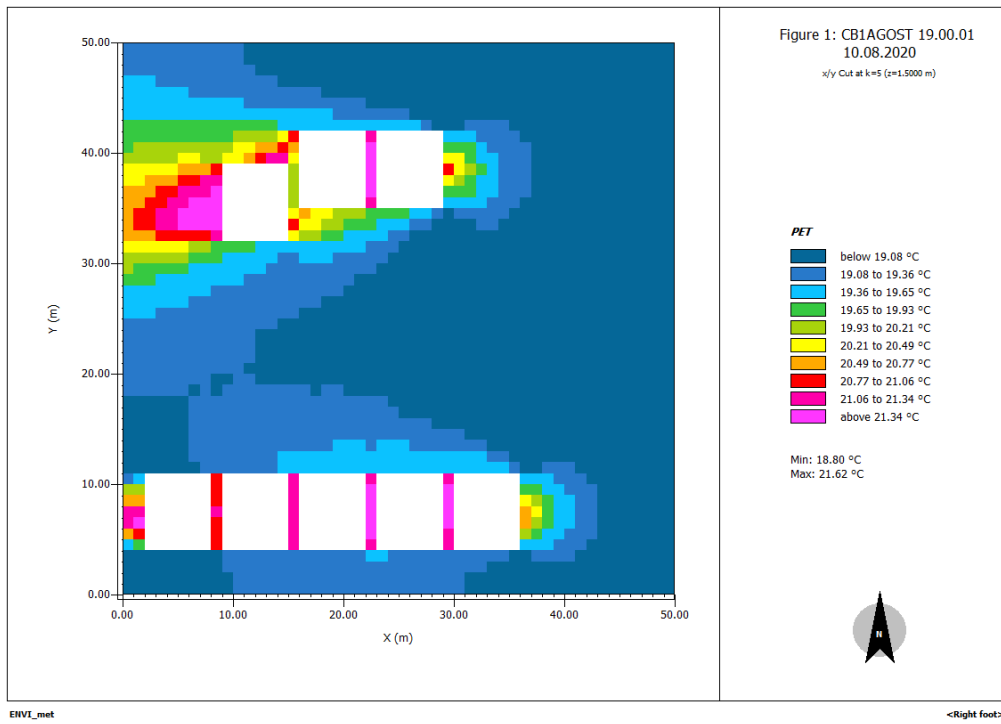
01 de agosto a las 17 h 00



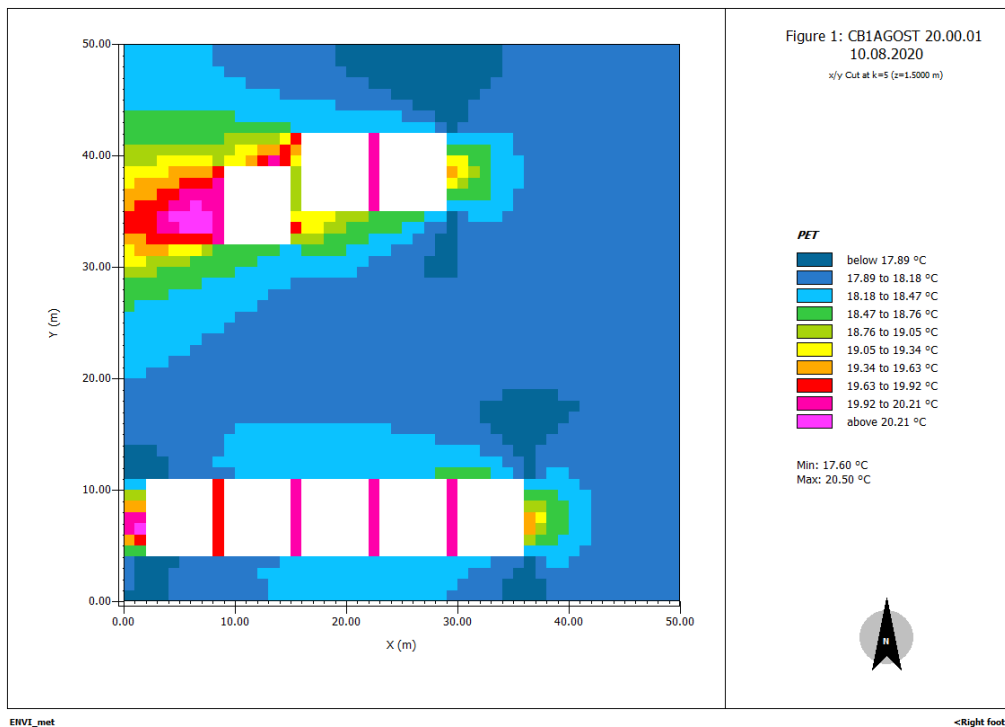
01 de agosto a las 18 h 00



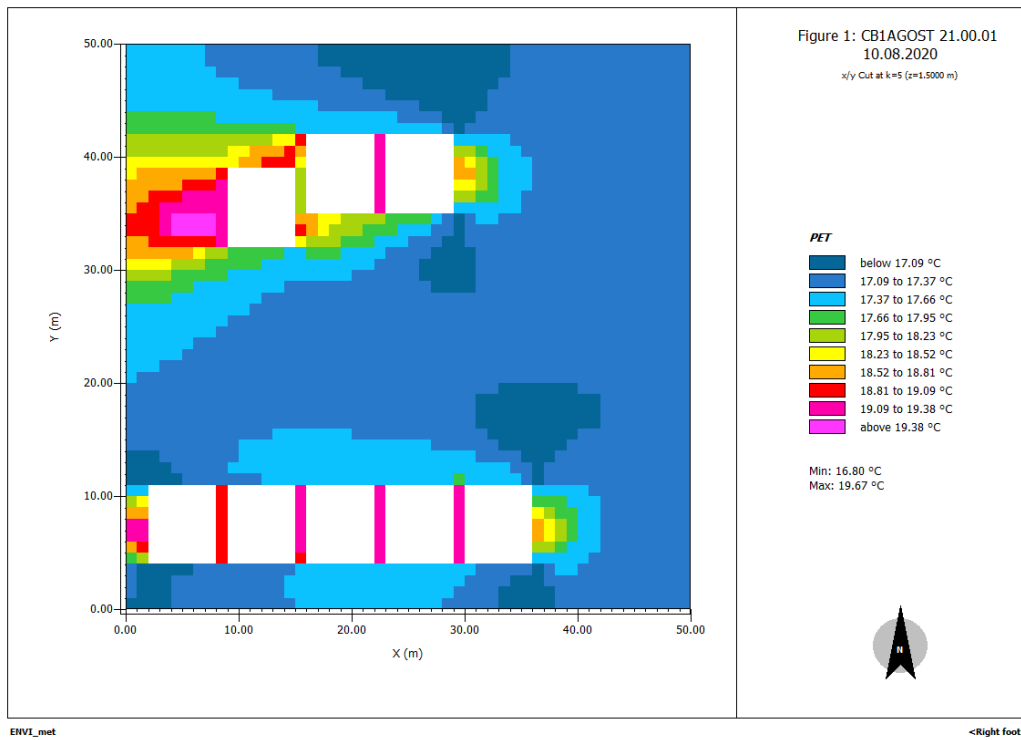
01 de agosto a las 19 h 00



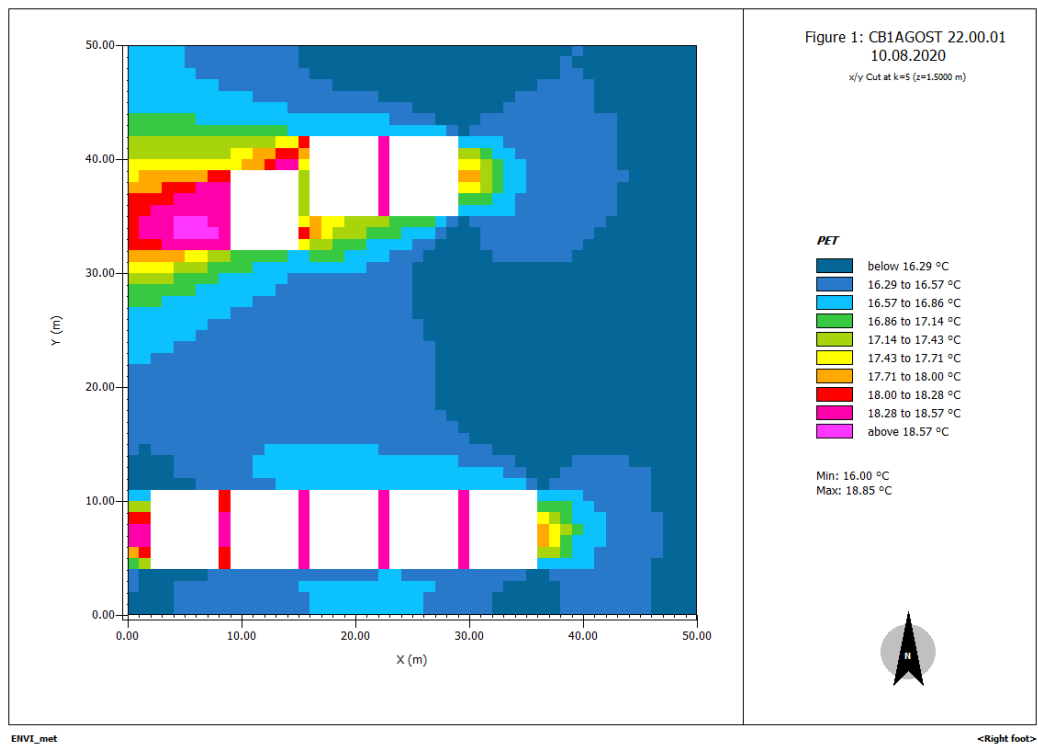
01 de agosto a las 20 h 00



01 de agosto a las 21 h 00



01 de agosto a las 22 h 00



01 de agosto a las 23 h 00

