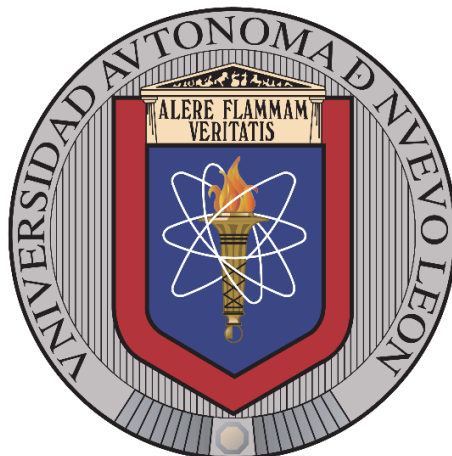


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS DE TECHO VERDE EXTENSIVO PARA EL
MEJORAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DEL MEDIO AMBIENTE**

PRESENTA

GERMÁN GARCÍA AVILA

**Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRIA EN CIENCIAS con orientación en Ingeniería Ambiental**

AGOSTO 2021

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE TECHO VERDE EXTENSI-VO PARA EL ME-
JORAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DEL MEDIO AMBIENTE”.**

Presenta

Ing. Germán García Avila

Vo. Bo.

Director de tesis

Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián

DEDICATORIA

Dedicada a mis padres:

Son mi guía, mi apoyo y motivación.

AGRADECIMIENTOS

La bondad, paciencia, comprensión y soporte de mis padres ha sido algo invaluable en estos 2 últimos años. Gracias a ellos, encuentro motivación que me impulsa a ser una mejor persona todos los días de mi vida.

Quisiera agradecer a mis familiares y amigos, quienes siempre creyeron y confiaron en mí para concluir esta nueva etapa de mi vida. De la misma manera, quiero agradecer el apoyo y comunicación de mis colegas y amigos de la maestría, que encontramos un apoyo mutuo en cada situación que nos enfrentábamos. Contar con su presencia hizo más fácil, ameno, divertido y pude disfrutar mucho más todo el proceso de la maestría.

Agradezco especialmente a mi director de tesis, Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián por su apoyo, en conocimiento, comprensión, paciencia, orientación y tiempo que me brindó en esta investigación, ya que, sin él, esto no habría sido posible. También quisiera agradecer al Dr. Adrián Leonardo Ferriño Fierro, que gracias a su experiencia, conocimiento y recursos fue posible lograr esta investigación. De la misma manera, agradezco al departamento del Centro Internacional del Agua (CIA), al ingeniero Juan de Dios Rodríguez, ingeniero Sergio Esquivel, ingeniero Caloca, que me apoyaron con información necesaria para llevar a cabo la investigación, así como asesoramientos en cuestiones técnicas y teóricas.

Finalmente, le doy gracias a la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), a la Facultad de Ingeniería Civil (FIC), por llenarme siempre de motivación, conocimientos y sabiduría para concluir cada trabajo presente. También al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), que por su apoyo económico fue posible darle la atención debida a la investigación y poder solventar los gastos necesarios para concluir con la presente investigación.

RESUMEN

El creciente desarrollo urbano ha provocado un incremento considerable en la temperatura de la superficie terrestre a nivel global. Uno de los principales motivos es el uso de materiales de construcción con baja reflectividad de la radiación solar en las zonas urbanas. En este sentido, los techos verdes surgen como una medida que permite mejorar el comportamiento térmico de un edificio. Por consiguiente, el objetivo de la presente investigación consistió en un análisis a nivel micro escala por medio de Prototipos de Techos Verdes Extensivos (PTVE) y a nivel macro escala a través de una modelación utilizando el programa ENVI-met, el cual permite cuantificar el gradiente de temperatura de edificios con techos convencionales en relación a edificios con techos verdes extensivos; así como su influencia en la temperatura del aire, temperatura de las superficies de los techos, y el flujo de calor en un edificio.

En la investigación, se buscó un enfoque práctico para la contribución a la mejorar del medioambiente. La propuesta del presente trabajo consistió en el análisis de las variables térmicas en los PTVE, lo cual permitió determinar el espesor adecuado de sustrato de los PTVE con el mejor rendimiento de temperatura con respecto a un techo convencional. A nivel micro escala se recopilaron e interpretaron datos de temperatura en los sustratos de los PTVE en un período de un año, a profundidades de 5, 10 y 15 centímetros respectivamente, junto con datos tomados superficialmente en el sustrato de los PTVE, y otro directamente en el techo convencional. Asimismo, se determinó por medio de una modelación, la influencia de los techos verdes en el comportamiento térmico de las variables térmicas a nivel de macro escala con el programa ENVI-met. Se seleccionó un área de tipo habitacional del municipio de San Nicolás de los Garza, Nuevo León, utilizando datos de radiación solar (W/m^2), temperatura ambiental ($^{\circ}C$), humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s), dirección del viento (grados) y precipitación (mm).

Los resultados obtenidos a nivel micro escala, muestran que el PTVE de mejor rendimiento térmico es el que tiene una profundidad de 15 cm, presentando una disminución de temperaturas máximas de hasta $29.90^{\circ}C$, expresada en porcentaje de 54.46% en épocas de verano y, manteniendo temperaturas más cálidas de $5.60^{\circ}C$ en épocas de invierno en comparación con un techo

convencional. Además, de mejorar la temperatura en el techo, los techos verdes tuvieron una gran estabilidad a las variaciones de temperatura a lo largo de las 24 horas del día. Por otro lado, a nivel macro escala, se determinó que aplicando en el modelo ENVI-met un 50% de techos verdes en el área seleccionada, los resultados mostraron un potencial de disminución de temperatura del aire de 0.47°C , una reducción de 13.51% en el flujo de calor y 2.30°C de temperatura en la superficialmente en época de verano. Finalmente, la aplicación de un medio con vegetación en un techo convencional, evita la absorción de los rayos solares a las superficies urbanas, mejorando el rendimiento térmico de los edificios en épocas de verano y en épocas de invierno.

ABSTRACT

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. GENERALIDADES	10
1.1.1. <i>Crecimiento demográfico y desarrollo urbano</i>	10
1.1.2. <i>Efectos del desarrollo urbano en la cantidad y la Isla de Calor Urbana (ICU)</i>	10
1.1.3. <i>Techos Verdes como medida de mitigación</i>	14
1.2. ANTECEDENTES.....	16
1.2.1. <i>Investigaciones internacionales</i>	16
1.2.2. <i>Investigaciones nacionales</i>	19
1.3. JUSTIFICACIÓN	24
1.4. HIPÓTESIS	26
1.5. OBJETIVOS	26
1.5.1. <i>Objetivo general</i>	26
1.5.2. <i>Objetivos particulares</i>	26
2. MARCO TEÓRICO	27
2.1. TECHOS VERDES	27
2.1.1. <i>Definición</i>	27
2.1.2. <i>Elementos de los techos verdes</i>	28
2.1.3. <i>Tipos de techos verdes</i>	30
2.1.4. <i>Beneficios ambientales</i>	31
2.2. ANÁLISIS DE LA VARIANZA	37
2.3. ENVI-MET	41
2.3.1. <i>Arquitectura del modelo ENVI-met</i>	41
2.3.2. <i>Modelo atmosférico</i>	42
2.3.1. <i>Entorno construido y sistema de construcción</i>	43
2.3.2. <i>Procesamiento interno del programa</i>	44
2.3.3. <i>Aplicaciones ENVI-met</i>	45
3. MARCO METODOLÓGICO	47
3.1. DISEÑO Y ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	47
3.2. ÁREA DE ESTUDIO	47
3.3. EVALUACIÓN DE LOS PROTOTIPOS DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS A NIVEL MICRO ESCALA.....	51

3.3.1. UBICACIÓN.....	51
3.3.2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS.....	53
3.3.3. TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS	59
3.3.4. TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS	62
3.4. EVALUACIÓN DE LOS PROTOTIPOS DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS A NIVEL MACRO ESCALA	63
3.4.1. UBICACIÓN.....	63
3.4.2. TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS	64
3.4.3. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS.....	65
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	80
4.1. RESULTADOS DE ANÁLISIS A NIVEL MICRO ESCALA DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS.....	80
4.1.1. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PTVE EN PRIMAVERA.....	81
4.1.2. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PTVE EN VERANO	87
4.1.3. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PTVE EN OTOÑO.....	94
4.1.4. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PTVE EN INVIERNO	98
4.1.5. RESUMEN ANUAL DE LOS RESULTADOS DE TEMPERATURA EN LOS PTVE	107
4.1.6. RESUMEN DE SENSORES CRÍTICOS.....	111
4.1.7. ANÁLISIS ANOVA.....	115
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS A NIVEL MICRO ESCALA DE LOS TECHOS VERDES EXTENSIVOS.....	117
4.3. RESULTADOS DE MODELACIÓN DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS Y DE TECHO CONVENCIONAL A NIVEL MACRO ESCALA POR EL PROGRAMA ENVI-MET	119
4.3.1. RESULTADOS DE MODELACIÓN EN ÉPOCA DE VERANO (08 DE JUNIO DE 2019)	119
4.3.1. RESULTADOS DE MODELACIÓN EN ÉPOCA DE INVIERNO (17 DE ENERO DE 2018).....	131
4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LA MODELACIÓN A NIVEL MACRO ESCALA DE LOS TECHOS VERDES EXTENSIVOS.....	143
5. CONCLUSIONES	146
6. BIBLIOGRAFÍA.....	148

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. ÍNDICE GLOBAL DE TEMPERATURA TERRESTRE Y OCÉANOS 1884. FUENTE DE DATOS: (NASA, 2021).....	11
FIGURA 1.2. ÍNDICE GLOBAL DE TEMPERATURA TERRESTRE Y OCÉANOS 2020. FUENTE DE DATOS: (NASA, 2021).....	12
FIGURA 1.3. ÍNDICE GLOBAL DE TEMPERATURA TERRESTRE Y OCÉANOS DE 1880 AL 2020. FUENTE DE DATOS: (NASA, 2021).....	12
FIGURA 1.4. TEMPERATURAS REGISTRADAS EN LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA 19061 “TOPO CHICO” (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA), 2021).....	13
FIGURA 2.1. COMPONENTES TÍPICOS DE UN TECHO VERDE (FUENTE: ADAPTADO DE (WILSON, BRAY, & COOPER, 2004)).....	30
FIGURA 3.1. IMAGEN SATELITAL DEL MUNICIPIO DE SAN NICOLÁS, DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD (CONABIO), 2021).....	48
FIGURA 3.2. USO URBANO DE LOS ESPACIOS CONSTRUIDOS EN EL MUNICIPIO DE SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (SADM, 2020)).....	49
FIGURA 3.3. MAPA DEL TIPO DE CLIMA DE ACUERDO A LA CLASIFICACIÓN KOPPEN MODIFICADA POR ENRIQUETA GARCÍA A PARTIR DE 1964 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE (COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD (CONABIO), 2021)..	50
FIGURA 3.4. PRECIPITACIÓN ANUAL DE LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA 19061 “TOPO CHICO” (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA), 2021).	51
FIGURA 3.5. UBICACIÓN DE PROTOTIPOS DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS EN EL TECHO DEL EDIFICIO DE POSGRADO DEL IIC DE LA UANL.	52
FIGURA 3.6. UBICACIÓN DE LOS PROTOTIPOS DE TECHOS VERDES EN LA AZOTEA DEL IIC DE LA UANL. ..	52
FIGURA 3.7. PROTOTIPOS DE TECHOS VERDES PTVE1 (A), PTVE2 (B), PTVE3 (C) Y PTVE4 (D).....	54
FIGURA 3.8. CAPA IMPERMEABLE. APLICACIÓN DE SELLADOR IMPERMEABLE BLANCO FIBRATADO DE MARCA THERMOTEK 19 CON DURACIÓN DE 5 AÑOS.	56
FIGURA 3.9. CAPA DRENANTE (ROCA VOLCÁNICA DE JARDINERÍA) Y CAPA FILTRANTE (MALLA GEOTEXTIL).	56

FIGURA 3.10. COMPOSICIÓN DEL SUSTRATO PARA LOS PROTOTIPOS DE TECHOS VERDES.	57
FIGURA 3.11. CAPA DE VEGETACIÓN UTILIZADA EN LOS PROTOTIPOS DE TECHOS VERDES (<i>PORTULACA GRANDIFLORA, DIMORPHOTHECA ECKLONIS, CATHARANTHUS ROSEUS Y DURANTA REPENS</i>).	58
FIGURA 3.12. EQUIPO ELITECH RC-51H PDF USB TEMPERATURE AND HUMIDITY DATA LOGGER REUSABLE RECORDER.	59
FIGURA 3.13. MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TEMPERATURA EN EL PROTOTIPO DE TECHO VERDE.	61
FIGURA 3.14. UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN EL PROTOTIPO DE TECHO VERDE.	61
FIGURA 3.15. ÁREA DE ANÁLISIS A NIVEL MACRO ESCALA.	64
FIGURA 3.16. CONFIGURACIÓN DE PROPIEDADES DEL TECHO VERDE EN EL DATABASE MANAGER EN ENVI-MET.	65
FIGURA 3.17. CONFIGURACIÓN DE PROPIEDADES DE LOS MUROS EN EL DATABASE MANAGER EN ENVI-MET.	66
FIGURA 3.18. CONFIGURACIÓN DE PROPIEDADES DE LOS TECHOS CONVENCIONALES EN EL DATABASE MANAGER EN ENVI-MET.	67
FIGURA 3.19. ÁREA DE TRABAJO DE LA SECCIÓN MONDE.	68
FIGURA 3.20. IMPORTACIÓN DE ARCHIVOS SHAPE DE LAS MANZANAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	68
FIGURA 3.21. ÁREA DE TRABAJO DE LA SECCIÓN SPACES.	69
FIGURA 3.22. IMPORTACIÓN DE IMAGEN CON FORMATO BMP PARA SER UTILIZADO DE BASEMAP EN LA SECCIÓN DE SPACES.	70
FIGURA 3.23. GENERACIÓN DE EDIFICIOS EN LA SECCIÓN SPACES DEL ÁREA DE ESTUDIO.	71
FIGURA 3.24. VISTA 3D DEL MODELO CON TECHOS VERDES EN UN 50% EN LA SECCIÓN SPACES.	71
FIGURA 3.25. INTERFAZ DE LA SECCIÓN ENVI-GUIDE.	75
FIGURA 3.26. DATOS PARA LA SIMULACIÓN.	76
FIGURA 3.27. SECCIÓN DE SELECCIÓN DEL TIPO DE IMPORTACIÓN DE DATOS.	77
FIGURA 3.28. IMPORTACIÓN DE DATOS.	77
FIGURA 3.29. VISUALIZACIÓN DE DATOS.	78
FIGURA 3.30. SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE IMPORTACIÓN DE DATOS.	78
FIGURA 3.31. GENERACIÓN DEL MODELO EN FASE TERMINADA.	79
FIGURA 4.1. VALORES MÁXIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE ABRIL DE 2020.	82
FIGURA 4.2. VALORES MÍNIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE ABRIL DE 2020.	83

FIGURA 4.3. VALORES PROMEDIO DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE ABRIL DE 2020.	84
FIGURA 4.4. VALORES MÁXIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE MAYO DE 2020.	85
FIGURA 4.5. VALORES MÍNIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE MAYO DE 2020.	86
FIGURA 4.6. VALORES PROMEDIO DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE MAYO DE 2020.	86
FIGURA 4.7. VALORES MÁXIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE JUNIO DE 2020.	87
FIGURA 4.8. VALORES MÍNIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE JUNIO DE 2020.	88
FIGURA 4.9. VALORES PROMEDIO DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE JUNIO DE 2020.	89
FIGURA 4.10. VALORES MÁXIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE JULIO DE 2020.	89
FIGURA 4.11. VALORES MÍNIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE JULIO DE 2020.	90
FIGURA 4.12. VALORES PROMEDIO DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE JULIO DE 2020.	91
FIGURA 4.13. VALORES MÁXIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE AGOSTO DE 2020.	92
FIGURA 4.14. VALORES MÍNIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE AGOSTO DE 2020.	93
FIGURA 4.15. VALORES PROMEDIO DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE AGOSTO DE 2020.	93
FIGURA 4.16. VALORES MÁXIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE OCTUBRE DE 2020.	94
FIGURA 4.17. VALORES MÍNIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE OCTUBRE DE 2020.	95
FIGURA 4.18. VALORES PROMEDIO DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE OCTUBRE DE 2020.	96
FIGURA 4.19. VALORES MÁXIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE NOVIEMBRE DE 2020.	96

FIGURA 4.20. VALORES MÍNIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE NOVIEMBRE DE 2020.....	97
FIGURA 4.21. VALORES PROMEDIO DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE NOVIEMBRE DE 2020.	98
FIGURA 4.22. VALORES MÁXIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE DICIEMBRE DE 2020.	99
FIGURA 4.23. VALORES MÍNIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE DICIEMBRE DE 2020.....	100
FIGURA 4.24. VALORES PROMEDIO DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE DICIEMBRE DE 2020.	100
FIGURA 4.25. VALORES MÁXIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE ENERO DE 2021.	101
FIGURA 4.26. VALORES MÍNIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE ENERO DE 2021.....	102
FIGURA 4.27. VALORES PROMEDIO DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE ENERO DE 2021.	102
FIGURA 4.28. VALORES MÁXIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE FEBRERO DE 2021.	103
FIGURA 4.29. VALORES MÍNIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE FEBRERO DE 2021.	104
FIGURA 4.30. VALORES PROMEDIO DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE FEBRERO DE 2021.	104
FIGURA 4.31. VALORES MÁXIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE MARZO DE 2021.	105
FIGURA 4.32. VALORES MÍNIMOS DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE MARZO DE 2021.....	106
FIGURA 4.33. VALORES PROMEDIO DE TEMPERATURA PRESENTADOS EN LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN LOS DISPOSITIVOS EN EL MES DE MARZO DE 2021.	106
FIGURA 4.34. VALORES DE TEMPERATURAS MÁXIMAS PRESENTADOS EN UN PERÍODO DE UN AÑO EN LOS PTVE.....	107
FIGURA 4.35. VALORES DE TEMPERATURAS MÍNIMOS PRESENTADOS EN UN PERÍODO DE UN AÑO EN LOS PTVE.....	109
FIGURA 4.36. VALORES DE TEMPERATURAS MÍNIMOS PRESENTADOS EN UN PERÍODO DE UN AÑO EN LOS PTVE.....	110

FIGURA 4.37. TEMPERATURAS MÁXIMAS ANUALES EN LOS SENSORES 4 Y 6.	111
FIGURA 4.38. TEMPERATURAS MÍNIMAS ANUALES EN LOS SENSORES 4 Y 6.	112
FIGURA 4.39. TEMPERATURAS PROMEDIO ANUALES EN LOS SENSORES 4 Y 6.	114
FIGURA 4.40. POTENCIAL DE TEMPERATURA DEL AIRE EN ESCENARIO DE TECHO CONVENCIONAL EN LA FECHA DE 08 DE JUNIO DE 2019 A LAS 04:00 HORAS.	120
FIGURA 4.41. POTENCIAL DE TEMPERATURA DEL AIRE EN ESCENARIO DE TECHO VERDE EN LA FECHA DE 08 DE JUNIO DE 2019 A LAS 04:00 HORAS.	121
FIGURA 4.42. POTENCIAL DE TEMPERATURA DEL AIRE EN ESCENARIO DE TECHO CONVENCIONAL EN LA FECHA DE 08 DE JUNIO DE 2019 A LAS 16:00 HORAS.	122
FIGURA 4.43. POTENCIAL DE TEMPERATURA DEL AIRE EN ESCENARIO DE TECHO VERDE EN LA FECHA DE 08 DE JUNIO DE 2019 A LAS 16:00 HORAS.	123
FIGURA 4.44. SENSIBILIDAD A LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESCENARIO DE TECHO CONVENCIONAL EN LA FECHA DE 08 DE JUNIO DE 2019 A LAS 04:00 HORAS.	124
FIGURA 4.45. SENSIBILIDAD A LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESCENARIO DE TECHO VERDE EN LA FECHA DE 08 DE JUNIO DE 2019 A LAS 04:00 HORAS.	125
FIGURA 4.46. SENSIBILIDAD A LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESCENARIO DE TECHO CONVENCIONAL EN LA FECHA DE 08 DE JUNIO DE 2019 A LAS 16:00 HORAS.	126
FIGURA 4.47. SENSIBILIDAD A LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESCENARIO DE TECHO VERDE EN LA FECHA DE 08 DE JUNIO DE 2019 A LAS 16:00 HORAS.	127
FIGURA 4.48. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE EN ESCENARIO DE TECHO CONVENCIONAL EN LA FECHA DE 08 DE JUNIO DE 2019 A LAS 04:00 HORAS.	128
FIGURA 4.49. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE EN ESCENARIO DE TECHO VERDE EN LA FECHA DE 08 DE JUNIO DE 2019 A LAS 04:00 HORAS.	129
FIGURA 4.50. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE EN ESCENARIO DE TECHO CONVENCIONAL EN LA FECHA DE 08 DE JUNIO DE 2019 A LAS 16:00 HORAS.	130
FIGURA 4.51. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE EN ESCENARIO DE TECHO VERDE EN LA FECHA DE 08 DE JUNIO DE 2019 A LAS 16:00 HORAS.	131
FIGURA 4.52. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE EN ESCENARIO DE TECHO CONVENCIONAL EN LA FECHA DE 17 DE ENERO DE 2018 A LAS 07:00 HORAS.	132
FIGURA 4.53. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE EN ESCENARIO DE TECHO VERDE EN LA FECHA DE 17 DE ENERO DE 2018 A LAS 07:00 HORAS.	133
FIGURA 4.54. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE EN ESCENARIO DE TECHO CONVENCIONAL EN LA FECHA DE 17 DE ENERO DE 2018 A LAS 16:00 HORAS.	134

FIGURA 4.55. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE EN ESCENARIO DE TECHO VERDE EN LA FECHA DE 17 DE ENERO DE 2018 A LAS 16:00 HORAS.	135
FIGURA 4.56. SENSIBILIDAD A LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESCENARIO DE TECHO CONVENCIONAL EN LA FECHA DE 17 DE ENERO DE 2018 A LAS 07:00 HORAS.	136
FIGURA 4.57. SENSIBILIDAD A LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESCENARIO DE TECHO VERDE EN LA FECHA DE 17 DE ENERO DE 2018 A LAS 07:00 HORAS.	137
FIGURA 4.58. SENSIBILIDAD A LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESCENARIO DE TECHO CONVENCIONAL EN LA FECHA DE 17 DE ENERO DE 2018 A LAS 16:00 HORAS.	138
FIGURA 4.59. SENSIBILIDAD A LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESCENARIO DE TECHO VERDE EN LA FECHA DE 17 DE ENERO DE 2018 A LAS 16:00 HORAS.	139
FIGURA 4.60. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE EN ESCENARIO DE TECHO CONVENCIONAL EN LA FECHA DE 17 DE ENERO DE 2018 A LAS 07:00 HORAS.	140
FIGURA 4.61. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE EN ESCENARIO DE TECHO VERDE EN LA FECHA DE 17 DE ENERO DE 2018 A LAS 07:00 HORAS.	141
FIGURA 4.62. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE EN ESCENARIO DE TECHO CONVENCIONAL EN LA FECHA DE 17 DE ENERO DE 2018 A LAS 16:00 HORAS.	142
FIGURA 4.63. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE EN ESCENARIO DE TECHO VERDE EN LA FECHA DE 17 DE ENERO DE 2018 A LAS 16:00 HORAS.	143

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. RESUMEN INVESTIGACIONES INTERNACIONALES.	22
TABLA 1.2. RESUMEN INVESTIGACIONES NACIONALES.	23
TABLA 3.1. ÁREA DEL USO URBANO DEL MUNICIPIO DE SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN (FUENTE: SADM, 2020).	48
TABLA 3.2. PARÁMETROS TÉCNICOS DEL ELITECH RC-51H PDF USB TEMPERATURE AND HUMIDITY DATA LOGGER REUSABLE RECORDER.	60
TABLA 3.3. UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA.	60
TABLA 3.4. DATOS UTILIZADOS PARA EL MODELO ENVI-GUIDE, EN LA FECHA 08 DE JUNIO DE 2019.	72
TABLA 3.5. DATOS UTILIZADOS PARA EL MODELO ENVI-GUIDE, EN LA FECHA 17 DE ENERO DE 2018.	73
TABLA 4.1. VALORES DE TEMPERATURAS MÁXIMAS PRESENTADOS EN UN PERÍODO DE UN AÑO EN LOS PTVE.	108

TABLA 4.2. VALORES DE TEMPERATURAS MÍNIMAS PRESENTADOS EN UN PERÍODO DE UN AÑO EN LOS PTVE.....	109
TABLA 4.3. VALORES DE TEMPERATURAS PROMEDIO PRESENTADOS EN UN PERÍODO DE UN AÑO EN LOS PTVE.....	111
TABLA 4.4. TEMPERATURAS MÁXIMAS ANUALES EN LOS SENSORES 4 Y 6.	112
TABLA 4.5. TEMPERATURAS MÍNIMAS ANUALES EN LOS SENSORES 4 Y 6.	113
TABLA 4.6. TEMPERATURAS PROMEDIO ANUALES EN LOS SENSORES 4 Y 6.	114
TABLA 4.7. ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA DE LAS TEMPERATURAS MÁXIMAS DE LOS SENSORES 4 Y 6.	115
TABLA 4.8. ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA DE LAS TEMPERATURAS MÍNIMAS DE LOS SENSORES 4 Y 6.	116
TABLA 4.9. ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA DE LAS TEMPERATURAS PROMEDIO DE LOS SENSORES 4 Y 6.	116

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

1.1.1. Crecimiento demográfico y desarrollo urbano

El crecimiento demográfico a nivel global ha sido evidente en las últimas décadas. De acuerdo a United Nations, DESA (2018), se estima una población total de 7.715 billones de habitantes en el año 2019 y, para el 2050, señalan que crecerá en un 26.67%. Esta gran cantidad de habitantes se dividen principalmente en las zonas rurales y urbanas, donde, en la segunda mencionada, se concentra en mayor proporción, debido a la creciente migración.

La migración de la población rural a las zonas urbanas, ha incrementado principalmente por la búsqueda de mayores oportunidades de empleos, la generación de ingresos y mejorar la calidad de vida (Wang, Hui, & Sun, 2017). En México, el 80% de la población se concentra en las zonas urbanas (en el año 2019) y, se estima que para el año 2050 aumentará hasta un 88% (United Nations, DESA, 2018).

Las ciudades se han vuelto un centro social y un sitio donde se puede mejorar la calidad de vida desde el punto de vista económico. Pero el desarrollo de las ciudades implica una expansión de la urbanización, mayor número de industrias y comercios, así como la explotación de recursos naturales. Lo anterior conlleva a un fuerte impacto en el medio ambiente, afectando la vida silvestre, generación de contaminantes, disminución del uso de vegetación, entre otras (Brown, Donovan, Schwenk, & Theobald, 2013; Du et al., 2019; Song, Liu, Gu, & Wang, 2018)

1.1.2. Efectos del desarrollo urbano en la cantidad y la Isla de Calor Urbana (ICU)

El efecto del crecimiento demográfico y las actividades humanas, así como la agricultura, urbanización, industrialización y la explotación de recursos naturales, crean modificaciones y alteraciones en las condiciones iniciales del uso de suelo (Huang et al., 2019).

La urbanización ha implicado la disminución de las áreas verdes, así como la utilización de materiales de baja permeabilidad y bajo aislamiento térmico. Esto tiene como consecuencia que disminuya la reflectancia de los rayos del sol y que los materiales absorban mayor cantidad de calor. Akbari & Rose (2008), mencionan que en un promedio de cuatro ciudades de Estados Unidos (Chicago, IL, Houston, TX, Sacramento, CA, y Salt Lake City, UT), la cobertura de vegetación abarca entre el 29 – 41%, la superficie pavimentada entre 29 – 30% y los techos corresponden entre un 19 – 25% del área total conurbada.

El efecto de la disminución de espacios verdes por materiales de construcción ha impactado en la Isla de Calor Urbana. De acuerdo a los datos históricos de la NASA (2021), establece como una etapa “estable” los años de 1951-1980. En los años anteriores hasta 1880, se tienen temperaturas más frías, siendo hasta -4 °C. Por el contrario, de los años 2000, hacia el 2020, se muestra que la temperatura superficial a nivel global ha aumentado desde la etapa de 1951-1980, hasta 4 °C, reflejándose mayormente en los polos. Esto se representa por las figura 1.1 y figura 1.2, respectivamente.

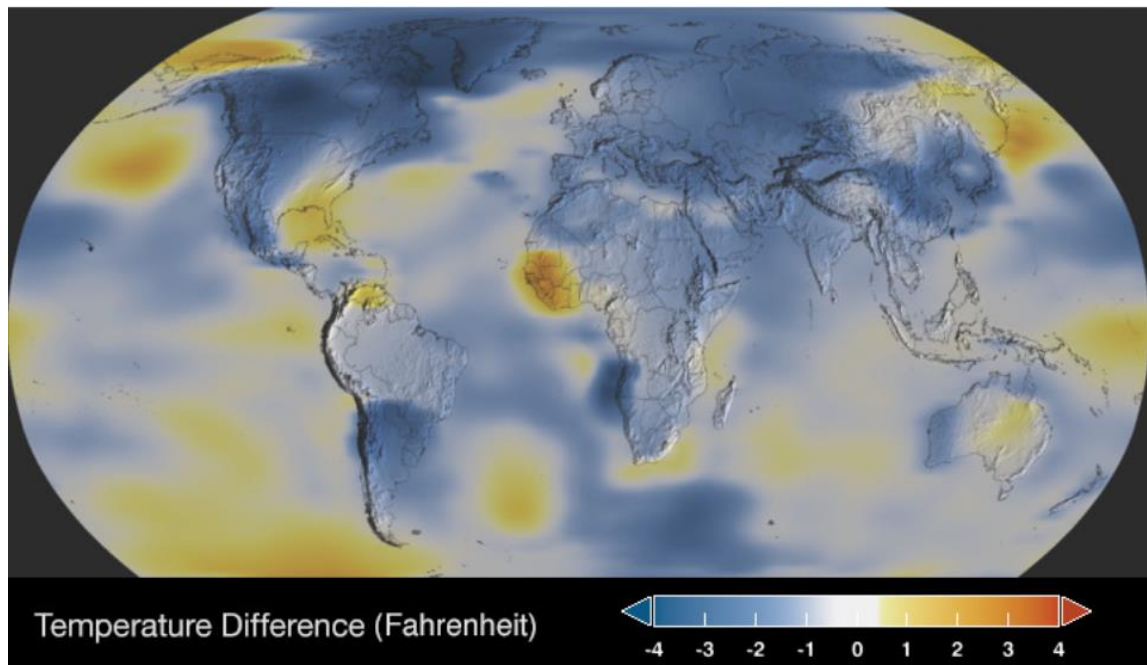


Figura 1.1. Índice Global de Temperatura Terrestre y Océanos 1884. Fuente de datos: (NASA, 2021).

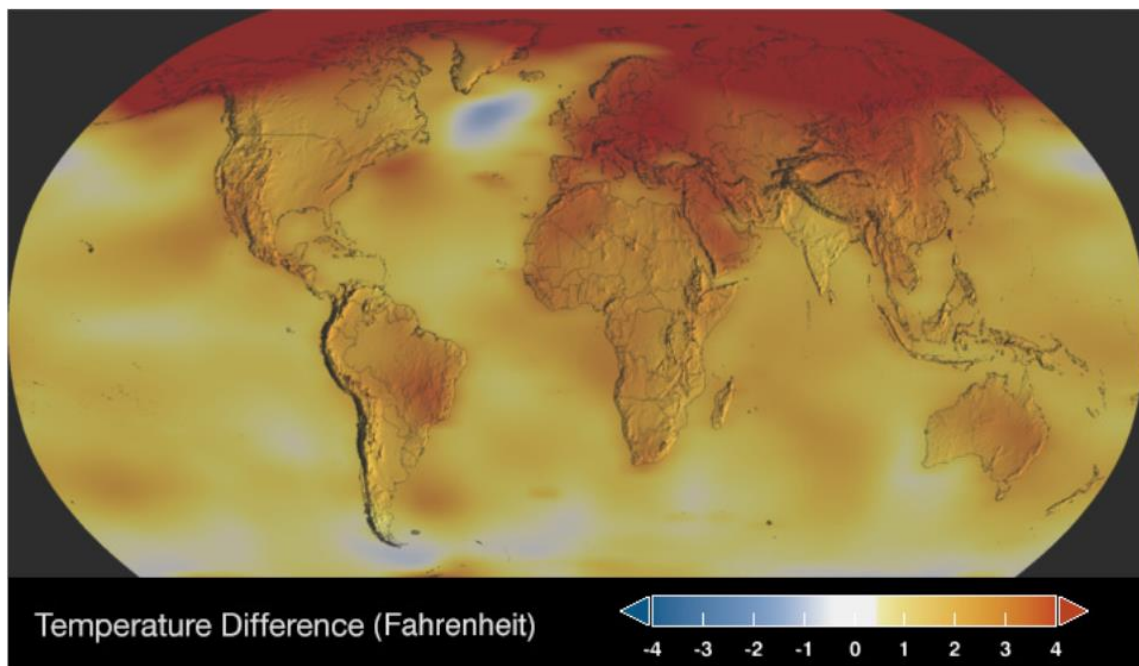


Figura 1.2. Índice Global de Temperatura Terrestre y Océanos 2020. Fuente de datos: (NASA, 2021).

Asimismo, en la figura 1.3, se observa la gráfica proporcionada por la NASA (2021), con los datos representados por las imágenes, para apreciar de una manera más acertada del incremento de temperaturas.

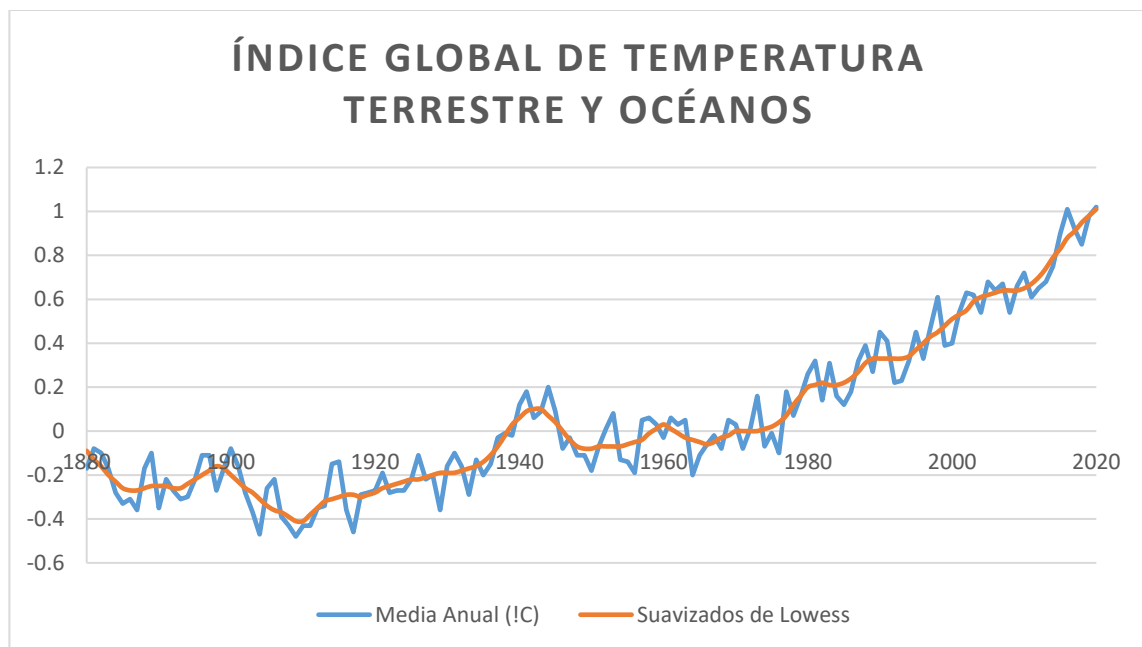


Figura 1.3. Índice Global de Temperatura Terrestre y Océanos de 1880 al 2020. Fuente de datos: (NASA, 2021).

El efecto del aumento de la temperatura del aire se ve reflejado de manera nacional, al reportar aumentos de temperatura en México. De acuerdo a Vargas & Magaña (2020), el efecto del rápido crecimiento urbano y las implicaciones de desarrollo poco sostenibles, ha provocado el aumento de temperatura de hasta 3°C solamente considerando el siglo 20.

Esto se ve reflejado de igual manera de manera local por la estación climatológica 19061, con el nombre de “Topo Chico”, ubicada en el municipio de San Nicolás de los Garza, Nuevo León, con las coordenadas Longitud: 100° 18' 29.8" y Latitud: 25° 43' 56.6". Cabe mencionar, que esta estación, se encuentra dentro de la zona de análisis de la evaluación a macro escala de la investigación. Por la figura 1.4 se observa las temperaturas máximas, promedio y mínimas presentadas desde el año 1960 al 2020. En ellas se puede observar que cada año, la tendencia del máximo de temperaturas va en incremento. Por otro lado, se tiende a presentarse temperaturas cada vez menores cada año. Y en promedio, las temperaturas se mantienen en valores similares, pero se debe prestar atención a los 2 extremos de temperatura, tanto las máximas, como las mínimas, ya que cada vez incrementan y disminuyen en mayor proporción, respectivamente.

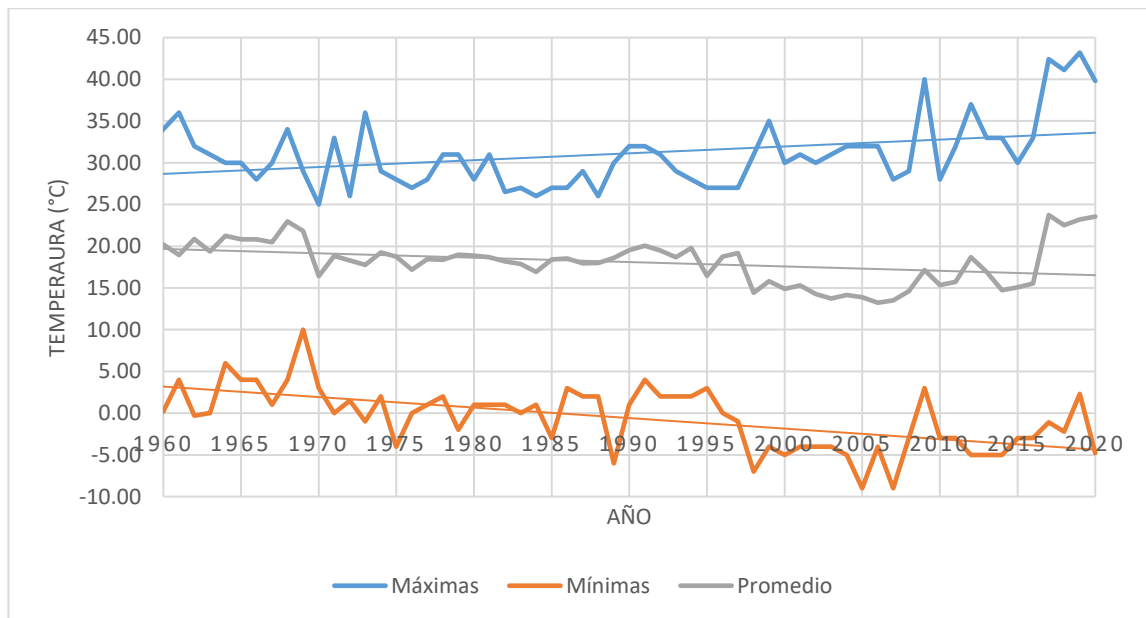


Figura 1.4. Temperaturas registradas en la estación climatológica 19061 “Topo Chico” (Fuente: Elaboración propia con datos de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2021).

1.1.3. Techos Verdes como medida de mitigación

La gran cantidad de área que abarcan las manchas urbanas, dificultan la ubicación de zonas para la implementación de vegetación. Por este motivo, aplicar vegetación en un edificio, es una estrategia viable a las zonas con escasez de zonas verdes (Chan & Chow, 2013).

Los techos verdes son sistemas tecnológicos complejos, que tiene ventajas térmicas contra los techos convencionales, donde su diseño trae beneficios ambientales y de energía, con referencia a reducir temperaturas dentro de las construcciones, reducción de la isla de calor urbana, mejorar la calidad del aire dentro de una construcción, entre otras (Ascione, Bianco, de' Rossi, Turni, & Vanoli, 2013).

Los presentes sistemas, también conocidos como techos con vegetación, eco techos, jardín de techo o techos vivos (Khotbehsara, Daemei, & Malekjahan, 2019; C. Liu & Hornikx, 2018; Shi et al., 2019; Voyde, Fassman, & Simcock, 2010), que tienen por concepto fomentar las vegetaciones obteniendo extensos beneficios en una amplia gama de áreas, como lo son principalmente en el ambiental, así como la rama social, además de tener efectos que mejoren aspectos económicos (Shafique, Kim, & Rafiq, 2018).

El valor ambiental de los techos verdes, se relaciona con la localización y el espacio en el que se implementan, como lo es la altura del edificio, el cual permite mejores rendimientos en la radiación solar, esto con alturas entre 15 y 25 metros, así como los que se encuentran a una distancia cercana a un cuerpo de agua (Asadi, Arefi, & Fathipoor, 2020).

En cuanto a las ventajas ambientales podemos encontrar el mejoramiento de la insolación de un edificio, atenuación de aguas pluviales, aislamiento acústico, reducción de la isla de calor urbana, extender el tiempo de vida e un edificio, hábitat para polinizadores, valor estético, aumentar la plusvalía, mejoramiento de la calidad del agua y la calidad del aire, entre otras (Vijayaraghavan & Joshi, 2015).

Con los beneficios y ventajas mencionadas de los techos verdes, es la razón por la que estos sistemas han sido bien vistos desde un punto de vista social, donde las personas han aceptado su implementación en países como Alemania, Australia, Estados Unidos, Reino Unido, España, entre otros.

De acuerdo a Rowe (2011), los techos verdes se pueden clasificar como extensivos e intensivos. Los techos verdes extensivos generalmente se utilizan con un espesor de sustrato no mayor a 15 centímetros, utilizando plantas de pequeño y mediano tamaño. En el caso de los techos verdes intensivos, el sustrato normalmente excede de los 15 centímetros, además que pueden utilizar plantas altas o árboles.

Los techos verdes, sin importar su clasificación tienen una estructura general, que se sigue para evitar daños en la estructura de la losa, como lo es el daño por las raíces de la vegetación, infiltración del agua, sobrecarga, entre otras. De acuerdo a Shafique et al. (2018), la estructura de los techos verdes se compone de una capa impermeable, una capa drenante, una capa filtrante, un medio de crecimiento (conocido como sustrato) y la capa de vegetación. Estas capas pueden variar de acuerdo con el objetivo de la aplicación del techo verde.

En la presente investigación se realizó la evaluación del efecto de los techos verdes en factores térmicos a nivel micro escala y nivel macro escala. El primero se efectuó por medio de experimentación, diseñando e implementando 4 prototipos de techos verdes extensivos con espesor del sustrato variables y uno sin vegetación. En ellos se colocaron termómetros en las profundidades de sustratos correspondientes, así como uno superficial y otro expuesto en el techo convencional. De esta manera, se recopilaron y analizaron los datos de temperatura desde el mes de abril del 2020 al mes de marzo de 2021. Por el otro lado, a nivel macro escala, se realizó una modelación por medio del programa ENVI-MET, modelando un área de estudio dentro de la Zona Metropolitana de Monterrey, en el municipio de San Nicolás de los Garza, para evaluar el efecto de los techos verdes en el potencial de la temperatura del aire, el flujo de calor superficial y la temperatura superficial.

1.2. ANTECEDENTES

Las investigaciones previas realizadas nos permiten obtener un panorama global de lo que se ha investigado. Con el objetivo de mantenernos actualizados en un tema de interés, de esta manera, se puede seguir la línea de investigación.

La aplicación de cubiertas de vegetación en los techos, son técnicas que han sido estudiadas internacionalmente con diversos enfoques, como lo es la determinación de la cantidad de emisiones de CO₂, retención del agua pluvial, retención de contaminantes pluviales, reducción de contaminación acústica, enfoques sociales, entre otros. Asimismo, el tema del efecto de la Isla de Calor Urbana (ICU), es uno de los temas que puede mejorar un techo verde. Los principales enfoques son del comportamiento térmico de un techo verde y uno convencional, reducción de temperaturas en el techo, así como la disminución del consumo de energía en un edificio a partir de modelaciones. Cada uno de estos enfoques tienen diversos parámetros que influyen en los resultados. A continuación, se mostrarán investigaciones internacionales y nacionales relacionados al presente proyecto de investigación.

1.2.1. Investigaciones internacionales

En Austin, Téchicas, Asadi, Arefi, & Fathipoor (2020), realizaron una simulación no-lineal de techos verdes a través de una Red Neuronal Artificial. Para el modelo se utilizaron los datos de Landsat 8 TIRS para estimar la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST), y para los parámetros de la morfología urbana para el modelo 3D, se aplicó información Light Detection and ranging (LiDAR). En el modelo se seleccionaron zonas con mayor potencial para la aplicación de cubierta de vegetación. Siendo así, obtuvieron que los de mayor efecto de enfriamiento son los que cuentan con alturas entre 15 y 25 metros. Determinaron que al ecologizar el 3.2% de los edificios, el promedio de TST disminuyó en 1.96°C. Esto indica la importancia de los techos verdes en la reducción de la ICU.

Por otro lado, en el continente africano, en Mauricio, Mungur et al. (2020), propusieron un modelos matemático unidimensional para simular la transferencia de calor y humedad de un techo verde. Para su simulación implementaron 9 celdas de concreto

con una cubierta de vegetación (espesor de concreto = 15 cm, membrana impermeable = 0.40 cm, sustrato = 20 cm y vegetación = 10 a 20 cm), las cuales se midieron 5 meses de temperatura exterior e interior de las celdas en intervalos de 1 minuto. Por medio del modelo matemático obtuvieron que el flujo de calor máximo en cada día para un techo convencional varió de 0.4797W/m^2 a 2.5190W/m^2 mientras que, para el techo verde, varió de 0.2090W/m^2 a 0.5312W/m^2 . Los resultados mostraron que el techo verde aumenta la masa térmica de las celdas, controla la variación del flujo del calor, atenúa los dos picos diurno y nocturno en la temperatura diaria y retrasa el pico de la tarde, y el flujo de calor de un techo convencional varió en gran medida en comparación con el techo verde.

Ziaul & Pal (2020), llevaron a cabo una investigación en la India, realizando una simulación con el programa ENVI-met, con el objetivo de obtener mejores estrategias para la mitigación del efecto de la ICU, evaluando el papel de la infraestructura verde en la mejora del confort térmico. El programa permite simular diferentes escenarios de techos con cubiertas de vegetación. En este estudio se realizaron cinco condiciones: condiciones de los edificios sin techos verdes (C1), 100% de ecologización de techo (C2), 100% de ecologización de techo y paredes (C3), 50% de ecologización de techo y paredes (C4) y: Plantación en área adecuada (C5). En el estudio se tomó en cuenta que el % de ecologización de los techos y las paredes para la simulación del microclima de los tres sitios seleccionados. Como resultados, se muestra que en un área adecuada con un 50% de ecologización del techo y las paredes en caso de área abierta de poca altura, informó una reducción de 2.6°C , 1.33°C y 1.87°C respectivamente. En zonas donde los edificios se encuentran con una gran separación se tienen resultados menores a los que se colocan en zonas con edificios con distancias más compactas, incluso aplicando el 100% de ecologización, por lo tanto, con un 50% en una zona de distancias compactas es la mejor estrategia para una altura baja abierta.

En España, Porcaro et al. (2019), analizaron experimentalmente a largo plazo el comportamiento térmico de prototipos de techo verde extensivo variando el tipo de sustrato, para compararlos con un prototipo de techo de referencia con cubierta de grava

lastrada. Los prototipos de techos verdes se constituyen de una membrana impermeable, una capa drenante, capa filtrante sustratos variables (P1 = 100% sustrato comercial (SC) y 0% Agregados Reciclados (AR), P2 = 75% SC y 25% AR, P5 = 50% SC y 50% AR) y vegetación mediterránea. Se realizó un análisis matemático a través de los datos recopilados en los prototipos, los parámetros fueron temperatura, flujo de calor, contenido volumétrico de agua, temperatura del aire, humedad relativa del aire, radiación solar, velocidad y dirección del viento y datos de precipitaciones. Los resultados obtenidos muestran que el factor de decremento se redujo en un promedio de 0.24 semanalmente; el tiempo de retraso se aumentó en un promedio de 6:08 h y 6:34 en verano e invierno, respectivamente; el flujo de calor disminuyó en un 66% y 63% en verano e invierno, respectivamente; mostrando un mejor desempeño del techo verde con la utilización el 100% de sustrato comercial. Además, se comprobó que este comportamiento se debió principalmente a la capacidad de retención del agua del sustrato; mientras mayor sea la retención de agua del sustrato se obtienen mejores beneficios térmicos, por lo tanto, manteniendo una humedad alta, se tienen resultados favorables.

Singapur es otro país en el que se han realizado investigaciones sobre medidas para mitigar el potencial de la ICU. Yang et al. (2018), realizaron modelaciones en los programas de Open Studio y Energy Plus, para comprender los efectos de los flujos de calor y las variaciones térmicas de los techos verdes y techos fríos, con el propósito de diseños y modificaciones futuros para la infraestructura actual. Para este estudio se utilizaron parámetros de espesor de sustrato, conductividad, densidad, trabajo, absorción solar y absorción visible. Se analizó el flujo de calor sensible liberado para diferentes reflectancias solares frente a la masa térmica y el aislamiento del edificio, también se analizó el flujo de calor sensible liberado frente a las características de las plantas y a la tasa de riesgo. Los resultados obtenidos mostraron que en los periodos pico del día de calor (9 am a 5 pm) los techos fríos reducen el calor 0.14 KWh/m² (8%) y los techos verdes mitigan en 0.008 KWh/m² (0.4%). En verano, los techos fríos y los techos verdes redujeron el calor por 15.53 (37%) y 13.14 (31%) KWh/m² respectivamente. De los resultados de la simulación se deduce que tanto los techos fríos como los verdes presentan una

reducción en la demanda de energía al disminuir el flujo de calor. Además, mencionan que mantener los techos verdes con alta humedad en el sustrato, presentan mayor potencial de mitigación, reteniendo mayor calor y retrasar la transmisión del calor al interior del edificio.

Australia es otro país que investigó el efecto de los techos verdes en la ICU. Razzaghmanesh, Beecham, & Salemi (2016), llevaron a cabo una investigación experimental a microescala, así como una simulación a macro escala en un entorno urbano por medio del programa ENVI-met para estimar el potencial de mitigación de la ICU. Diseñaron cuatro prototipos de techos verdes, dos extensivos y dos intensivos, con dos diferentes tipos de sustrato (A y B). Los resultados por medio de las mediciones en los prototipos de techos verdes muestran una mejora en el comportamiento térmico, presentando temperaturas más bajas durante el horario diurno y temperaturas más altas en el horario nocturno, esto demuestra que la dirección del flujo de calor fue generalmente de la capa superior a la inferior durante el día y en la dirección inversa durante la noche. Los resultados para cubrir el 30% del área total de la cubierta con cubiertas verdes en una típica tarde cálida de verano entre las 14:00 y las 15:00 horas, indican que la temperatura de la superficie se reduciría en 0.06 °C y también existe una diferencia vertical de 0.25 °C entre la temperatura de la superficie. Asimismo, mencionan que cubrir de vegetación un 30% de un área urbana puede reducir el consumo de energía 2.5 W/m²/día.

1.2.2. Investigaciones nacionales

De igual manera, en México se han realizado estudios sobre el comportamiento de los techos verdes. En los últimos años se han publicado artículos sobre este tema, pero sigue siendo una implementación nueva para el país. Por lo tanto, estas investigaciones son pocas, y en consecuencia, también el estado de Nuevo León cuenta con bajas investigaciones al respecto. A continuación, se muestran algunas de ellas.

Polo-Labarrios, Quezada-García, Sánchez-Mora, Escobedo-Izquierdo, & Espinosa-Paredes (2020), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), llevaron a

cabo un modelo matemático transitorio de transferencia de calor, para evaluar la comparación del comportamiento térmico de un techo verde con respecto a uno convencional. El modelo está implementado para dos edificios, uno con techo convencional y otro con techo verde. Para cada sistema se estudian dos casos diferentes. Por medio de este modelo se observa el comportamiento de la conducción, emisión y convección de calor en el techo verde y el techo convencional. Los resultados muestran que los techos verdes reducen las fluctuaciones de temperatura interior de los edificios hasta 14 °K, en comparación con los techos convencionales. Adicionalmente, los techos verdes permiten alcanzar la temperatura de confort: la temperatura dentro de los edificios se reduce hasta 12 °K para climas cálidos como Ciudad de México.

En Cuernavaca, México, Ávila-Hernández et al. (2020), implementaron un prototipo de techo verde y un prototipo de techo convencional debajo de una estructura de concreto, para que en ella se aplicara aire acondicionado para evaluar el consumo de energía para ambos casos. El objetivo de esta investigación consiste en comparar un techo convencional de un techo verde bajo condiciones climáticas de ocho ciudades de México (Nuevo León, Baja California Sur, Sonora, Tlaxcala, Ciudad de México, Hidalgo, Colima y Quintana Roo), con los datos recopilados de los prototipos se valida el modelo en el programa EnergyPlus, comparando las ocho ciudades. De los resultados de la simulación anual, las ciudades con las reducciones más significativas para la temperatura promedio del aire interior fueron Hermosillo con 4.7 ° C y La Paz con 3.2 ° C. Las ciudades con mayor porcentaje en la reducción de energía para calentar el edificio son Chetumal, Colima y Hermosillo con 45,7%, 42% y 36,4%, respectivamente. Las ciudades con las reducciones más significativas de las emisiones de CO² fueron Chetumal, Colima y Hermosillo con 45,7%, 42% y 36,4%, respectivamente. Finalmente, realizaron una evaluación del retorno de inversión para la instalación de techos verdes, la que reveló un menor periodo de retorno fue en Hermosillo, Ciudad de México, con un tiempo de 8.8 años.

Igualmente en Cuernavaca, México Chagolla-Aranda et al. (2017), presentan una evaluación térmica experimental comparando el desempeño térmico de un techo verde con un techo convencional, utilizando celdas de prueba al aire libre. De la misma forma

que el estudio anterior, se colocaron los prototipos sobre unas celdas las cuales se conectaron aire acondicionado para determinar la evaluación del ahorro de energía. La experimentación consistió en medir las temperaturas y los flujos de calor en ambas celdas, para conocer cómo influye el riego en los parámetros. Dentro de los resultados, obtuvieron que después del riego de la cubierta verde, la temperatura máxima de la vegetación, el sustrato y la losa disminuyeron 6.4, 4.8 y 1.3 °C, respectivamente. Durante el día, la temperatura de la superficie exterior del techo verde fue 20.5 °C más baja que la del concreto, siendo incluso 6.8 °C más baja que la del ambiente, siendo el techo de concreto 15.3 °C más alta que la temperatura ambiente. Por la noche, la temperatura en el techo verde fue 7.1 °C más cálida que el techo convencional y 5.4 °C que la temperatura del ambiente, siendo la del techo convencional 3.8 °C más baja que la del ambiente. Durante el día el techo verde eliminó el flujo de calor 21.9 W/m², mientras que el techo convencional aportó 64.2 W/m². Durante la noche, el Techo Verde es hasta 10.7 W/m², mientras que el convencional llegó hasta 29 W/m². La celda de prueba con techo verde tuvo un consumo de electricidad acumulado 1,3 kWh/m² menor que la celda de prueba con techo convencional, lo que representa un 10,3% menos de consumo eléctrico que el techo convencional.

Por último Huelsz, Barrios, & Rojas (2014), en la UNAM, realizaron una investigación con una modelación sobre la transferencia de calor de un techo y muro verde, en climas de México. El objetivo, fue realizar un análisis de sensibilidad en un edificio con sistemas de cubierta verde. Se aplicó el método Monte Carlo para construir una distribución de la temperatura dentro del edificio. Las muestras utilizadas fueron la radiación solar, temperatura del ambiente, tasa de evapotranspiración y la velocidad del viento. Dentro de los resultados, se demostró la transferencia de calor pueden ser superiores al 80% para edificios con aire acondicionado y superiores al 800% para el caso sin aire acondicionado.

Tabla 1.1. Resumen investigaciones internacionales.

INVESTIGACIONES INTERNACIONALES						
Artículo	Autor (es)	Año	Parámetros analizados	Método	Resultados	
Simulation of green roofs and their potential mitigating effects on the urban heat island using an artificial neural network: A case study in Austin, Texas	Anahita Asadi, Hossein Arefi, Hafez Fathipoor	2020	Se analizaron zonas urbanas con mayor potencial de aplicación de techos verdes	Simulación no-lineal de techos verdes a través de una Red Neuronal Artificial	Al ecologizar el 3.2% de los edificios, el promedio de la Temperatura de la Superficie Terrestre disminuyó en 1.96°C	
A numerical and experimental investigation of the effectiveness of green roofs in tropical environments: The case study of Mauritius in mid and late winter	Maheshsingh Mungur, et. al.	2020	Se midieron datos de temperatura interior y exterior de 9 celdas de concreto con cubierta de vegetación durante 5 meses en intervalos de 1 minuto.	Modelación matemática.	* El flujo de calor máximo en cada día para un techo convencional varió de 0.4797W/m2 a 2.5190 W/m2 mientras que, para el techo verde, varió de 0.2090 W/m2 a 0.5312 W/m2.	
Modeling the effects of green alternative on heat island mitigation of a meso level town, West Bengal, India	Sk Ziaul, Swades Pal	2020	Se modelaron cinco condiciones de ecologización de una zona urbana: * C1 = Condiciones existentes * C2 = 100% de ecologización de techo * C3 = 100% de ecologización de techo y paredes * C4 = 50% de ecologización de techo y paredes * C5 = Plantación en área adecuada * Temperatura * Flujo de calor	ENVI-met	En un área urbana en condiciones de alturas medias abiertas, en un área adecuada con 50% de techos y muros verdes, se reduce la temperatura del aire hasta 2.6°C	
Long term experimental analysis of thermal performance of extensive green roofs with different substrates in Mediterranean climate	M. Porcaro, M. Ruiz de Adana, F. Comino, A. Peña, E. Martín-Consuegra, T. Vanwalleghem	2019	* Contenido volumétrico de agua * Temperatura del aire * Humedad relativa del aire * Radiación solar * Velocidad y dirección del viento * Datos de precipitaciones	Análisis matemático a través de los datos recopilados en los prototipos	* Factor de decremento reducido a 0.24 semanalmente * Tiempo de retraso se aumentó 6:08 h y 6:34 h en verano e invierno, respectivamente * Flujo de calor reducido en 66% y 63% en verano e invierno, respectivamente * Mejor desempeño térmico con sustrato 100% comercial * Mejores resultados con mayor porcentaje de humedad en el techo verde	
Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate	Junjing Yang, Devi Ilamathy Mohan Kumar, Andri Pyrgou, Adrian Chong, Mat Santamouris, Denia Kolokotsa, Siew Eang Lee	2018	* Comprender los efectos de los flujos de calor y las variaciones térmicas de los techos verdes y fríos * Se utilizaron parámetros de espesor de sustrato, conductividad, densidad, trabajo, absorción solar y absorción visible	Modelación en Open Studio y Energy Plus	* Reducción de calor de los techos fríos de 0.14 KWh/m2 (8%) y los techos verdes en 0.008 KWh/m2 (0.4%) en las horas pico del día (9 am y 5 pm) * Los techos fríos y los techos verdes redujeron el calor por 15.53 (37%) y 13.14 (31%) KWh/m2 respectivamente	
The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia	Mostafa Razzaghamanesh, Simon Beecham, Telma Salemi	2016	* Temperatura en sustratos * Flujo de calor en sustratos * Humedad relativa en sustratos	* Investigación experimental a microescala * Simulación numérica a macro escala por el programa ENVI-met	Abarcar el 30% de techos verdes en un área urbano en verano, en un horario pico * La temperatura de la superficie se reduce 0.06°C * Existe un diferencia vertical de 0.25°C entre la temperatura de la superficie * Reduce el consumo de energía en 2.5 W/m2/día	

Tabla 1.2. Resumen investigaciones nacionales.

INVESTIGACIONES NACIONALES						
Artículo	Autor (es)	Año	Parámetros analizados	Método	Resultados	
Comparison of thermal performance between green roofs and conventional roofs	Marco A. Polo-Labarríos, Sergio Quezada-García, Heriberto Sánchez-Mora, M. Azucena Escobedo-Izquierdo, Gilberto Espinosa-Paredes	2020	Se monitorea el consumo de energía de un aire acondicionado en un edificio con techo convencional y otro verde	Modelo matemático transitorio de transferencia de calor	<ul style="list-style-type: none"> * Los techos verdes redujeron fluctuaciones de temperatura en el interior de los edificios de hasta 15 °K * Los techos verdes permiten alcanzar la temperatura de confort: la temperatura dentro de los edificios se reduce hasta 12 K para climas cálidos como Ciudad de México. 	
Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico	A. Ávila-Hernández, E. Simá, J. Xamán, I. Hernández-Pérez, E. Téllez-Velázquez, M. A. Chagolla-Aranda	2020	Se comparó un techo tradicional y un techo verde bajo tres climas predominantes de México: árido, cálido y templado, en 8 ciudades de México	Simulaciones térmicas utilizando el software EnergyPlus	<ul style="list-style-type: none"> * Se redujo en Hermosillo la temperatura promedio del aire interior en 4.7 °C * Se redujo el consumo de energía en un 45.7%, 42% y 36.4%, en Chetumal, Colima y Hermosillo, respectivamente. * Las emisiones de CO₂, se redujeron en un 45.7%, 42% y 36.4%, en Chetumal, Colima y Hermosillo, respectivamente. * El retorno de inversión para la instalación de techos verdes, se puede obtener en 8.8 años para la Ciudad de Hermosillo. 	
Effect of irrigation on the experimental thermal performance of a green roof in a semi-warm climate in Mexico	M. A. Chagolla-Aranda, E. Simá, J. Xamána, G. Álvarez, I. Hernández-Pérez, E. Téllez-Velázquez	2017	En un lapso de 8 días, en un techo verde y uno convencional se midieron: <ul style="list-style-type: none"> * Temperaturas * Flujos de calor 	Evaluación térmica experimental	<ul style="list-style-type: none"> * Manteniendo una humedad arriba del 90% en el sustrato, la temperatura máxima de vegetación, el sustrato y la losa se disminuyen en 6.4, 4.8 y 1.3 °C, respectivamente. * Durante el día, la temperatura de la superficie exterior del techo verde fue 20.5 °C más baja que la del concreto, siendo incluso 6.8 °C más baja que la del ambiente 	
Differences on Results from Steady-state and Time-dependent Wall/roof Heat Transfer Models in Mexican Climate	S. Quezada-García, G. Espinosa-Paredes, A. Vázquez-Rodríguez, J.-J. Ambríz-García & A.-M. Escobedo-Izquierdo	2016	<ul style="list-style-type: none"> * Radiación solar * Temperatura ambiente * Tasa de evapotranspiración * Velocidad del viento 	Método Monte Carlo para la construcción de una distribución de la temperatura dentro del edificio (TIB) como un predictor variable	<ul style="list-style-type: none"> * Se demostró la transferencia de calor pueden ser superiores al 80% para edificios con aire acondicionado y superiores al 800% para el caso sin aire acondicionado 	

1.3. JUSTIFICACIÓN

Los materiales de construcción que conforman las edificaciones en las zonas urbanas utilizan materiales de baja reflectancia de los rayos del sol, aumentando la absorción de calor, produciendo el efecto conocido como Isla de Calor Urbana (ICU). La importancia de este fenómeno ha sido de mayor relevancia en las últimas décadas, en consecuencia, a que ha generado un fuerte impacto en el aumento de temperatura a nivel global.

Ante esta situación, es importante el desarrollo de tecnologías sostenibles que sean adaptables al desarrollo urbano y al ya existente. Los techos verdes nacen bajo esta necesidad, por su capacidad de adaptación a casi cualquier entorno urbano, como industrias, áreas públicas, edificios, residencias, entre otras, siendo una de las herramientas más adaptables y de mayor eficiencia en el cambio climático. Gracias a esto, permite contribuir a la disminución del efecto de la ICU, la generación de valor ambiental en la construcción, promover el desarrollo sostenible, creando espacios más verdes, beneficiando a desarrolladores urbanos, la vida silvestre, y al medio ambiente en general.

Es por esto, que se propone diseñar e implementar Prototipos de Techos Verdes Extensivos (PTVE) para monitorear su comportamiento térmico, determinando el gradiente de temperatura presente en comparación con un techo convencional. Asimismo, realizar una modelación por medio del programa ENVI-met para obtener resultados a nivel de macro escala, del comportamiento térmico de los techos verdes en un área típica urbana de la Zona Metropolitana de Monterrey.

Por lo tanto, la propuesta teórica del presente trabajo será el análisis de las variables térmicas en prototipos de techos verdes extensivos (PTVE). Esto permitirá determinar el espesor de un sustrato adecuado con el mejor rendimiento en la variación de temperatura en los PTVE con respecto a una losa convencional, así como el comportamiento térmico a nivel de macro escala por medio del programa ENVI-met, siendo aplicable a una población de las zonas de clima Templado con invierno seco (Cw, clasificación de Köppen modificada por García). Cabe subrayar que el análisis a micro escala (prototi-

pos) será aplicado para las variables de temperaturas máximas, mínimas y promedio diarias para cuatro PTVE de espesor de sustrato variable (5, 10 y 15 cm), asimismo, para las variables del nivel macro escala para la temperatura del aire, temperatura de las superficies de los techos, radiación solar y la temperatura interna del edificio.

1.4. HIPÓTESIS

Realizar un análisis experimental de techos verdes a nivel micro escala y a nivel macro escala por medio de una modelación, permitirá determinar la influencia que ejercen sobre un techo convencional, en el comportamiento térmico de la superficie de un edificio, así como en la temperatura del aire, temperatura de las superficies de los techos, radiación solar y la temperatura interna del edificio.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Realizar un análisis a nivel micro escala por medio de Prototipos de Techos Verdes Extensivos (PTVE) y a nivel macro escala por medio del programa ENVI-met, para determinar el comportamiento térmico de los techos verdes en comparación con los techos convencionales.

1.5.2. Objetivos particulares

1. Diseñar, implementar y ubicar prototipos de techos verdes extensivos para su análisis a nivel micro escala.
2. Determinar el gradiente de temperatura y el comportamiento térmico mensual a nivel micro escala de los techos verdes con respecto a los techos convencionales.
3. Determinar la relación del gradiente de temperatura entre el techo convencional con el sensor de mejor rendimiento térmico de los PTVE aplicando la metodología del análisis de la varianza por el método ANOVA.
4. Establecer el espesor de sustrato adecuado para un mejor rendimiento térmico.
5. Delimitar y seleccionar un área de la Zona Metropolitana de Monterrey para realizar una modelación de escenarios con techos verdes extensivos a nivel macro escala.
6. Estimar el efecto que los techos verdes impactan en los parámetros térmicos a nivel macro escala en un área de la ZMM.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. TECHOS VERDES

2.1.1. Definición

Los techos verdes son técnicas de infraestructura verde capaz de mitigar efectos de contaminación urbana, cambio climático y ayuda a la regeneración de vegetación (L. Liu, Cao, Ali, Zhang, & Wang, 2021). Su aplicación en los techos de los edificios pueden ser de manera total o parcial, pero siempre tomando en cuenta la estructura del mismo, considerando su capa de impermeabilización contra raíces, capa de drenaje, capa filtrante, medio de crecimiento (sustrato) y capa de vegetación (Mungur et al., 2020).

Los techos verdes tienen origen desde años muy antiguos. Se ha encontrado por restos arqueológicos, evidencias de techos verdes desde el período Neolítico. Pero no es hasta que los países Nórdicos (Suecia, Finlandia, Islandia, Dinamarca, Noruega, Groenlandia, Vinlandia y las Islas Feroe), que comenzaron con la innovación de estas técnicas como respuesta a los climas extremadamente fríos. Por ejemplo, una referencia de los techos verdes, se encuentra en los años 500 a.C., con el Jardín Colgante de Babilonia (Jim, 2017). Posteriormente, en la década de 1960, Alemania comenzó a innovar las técnicas de los techos verdes como una forma más moderna, con el objetivo de reducir el consumo de energía de los edificios. Por los beneficios ambientales que estas técnicas desempeñan, países como Estados Unidos, Canadá, Singapur, Australia, Japón, China, Hong Kong y Corea del Sur, han optado por aplicarlos en el desarrollo urbano, incluso, estableciendo fuertes iniciativas para la aplicación de los techos verdes (Shafique et al., 2018).

Debido a la adopción de la técnica de techos verdes en los ambientes urbanos de diversos países, ha sido considerada la mejor tecnología para minimizar impactos ambientales negativos (W. Liu et al., 2019). Estas técnicas han podido implementarse en nuevos desarrollos de viviendas y edificios, con la única limitación de edificios antiguos, ya que, se cuenta con escasa estabilidad y resistencia mecánica (Cristiano et al., 2020).

Pero aun considerando esa limitación, es una técnica ampliamente aceptada en centros urbanos densamente poblados porque el terreno urbano ya se encuentra limitado para la implementación de infraestructura verde (L. Liu et al., 2021).

Estas características han sido motivo de la implementación en la presente investigación por medio de una experimentación a nivel micro escala y una modelación de nivel macro escala (aplicado a 3 manzanas de un área dentro del municipio de San Nicolás de los Garza, Nuevo León).

2.1.2. Elementos de los techos verdes

De acuerdo a Kellagher et al. (2007), un medio de vegetación de un techo implica varios puntos a tomar para su instalación, de los más vitales es el asegurar que el techo donde se implementará, cuente con la pendiente suficiente para desalojar el agua excedente cuando se presenten lluvia. Cuando se tienen pendiente pronunciadas (mayores de 1 en 10), se debe aumentar la capacidad de retención del sustrato. Para pendientes mayores de 1 en 3, se debe tomar en cuenta el deslizamiento y erosión del suelo.

Otra consideración a tomar para la implementación de un techo verde es la carga, ya que, los techos verdes están dentro de los rangos de 71.38 Kgf/m² a 509.86 Kgf/m², desde un techo extensivo a uno intensivo.

Ya bien tomando las consideraciones previas a la instalación de los techos verdes, ahora se deben tomar en cuenta las capas que lo conforman. Inicialmente, en el techo se debe de considerar la impermeabilización de la estructura, evitando que el agua y/o la humedad que se mantiene en el sustrato, daño al techo. Por este motivo, se coloca un impermeabilizante, preferiblemente que sea contra raíces, para evitar daños en la estructura.

La siguiente, es una capa de drenaje, donde se tiene la opción de utilizar rocas porosas con la capacidad de flujo de agua, así como también algún material polímero que tenga la capacidad del desalojo de agua en exceso.

Posteriormente, se coloca una malla o filtro geotextil. La función de esta capa, es colocarla encima de la capa drenante para evitar que el sustrato se mezcle y evite el flujo del agua, por este motivo, la malla geotextil da la capacidad de filtración hacia la parte drenante y también se evita obstrucciones por medio del sustrato.

Por encima de la malla geotextil, se encuentra una de las capas claves para el funcionamiento del techo verde, el cual es el sustrato o el medio de vegetación. Esta capa de techo verde cumple una función fundamental, ya que, en ella se desarrollarán las plantas. Además, dependiendo de la composición del sustrato, así como el espesor, se pueden tener diferentes rendimientos térmicos, mejoramiento de la calidad del agua, mayor retención del agua pluvial, aumentar el desarrollo de las plantas, así como variar las propiedades físicas de su porosidad, capacidad de drenaje, densidad, etc.

La última capa se encuentra en la parte superficial, la cual es la capa de vegetación. En ella, se pueden utilizar infinidad de plantas dependiendo de la zona en la que se encuentre. Preferiblemente se utilizan plantas nativas en la región, ya que, los techos verdes pueden ser ubicados en zonas de climas fríos, climas calientes, climas húmedos, tropicales, etc. Por lo tanto, su selección cuenta una parte fundamental para varios factores, como lo es la evapotranspiración, evaporación, absorción de contaminantes, mejoramientos térmicos, etc.

Los techos verdes, sin importar su clasificación tienen una estructura general, que se sigue para evitar daños en la estructura de la losa, como lo es el daño por las raíces de la vegetación, infiltración del agua, sobrecarga, entre otras. De acuerdo a Shafique et al. (2018), los techos verdes su estructura desde la estructura de la losa hasta la última capa, es: una capa impermeable, una capa drenante, una capa filtrante, un medio de crecimiento (conocido como sustrato) y la capa de vegetación. Estas capas pueden variar de acuerdo con el objetivo de la aplicación del techo verde. En la figura 2.1, se observa la estructura general de un techo verde, con las capas mencionadas anteriormente.

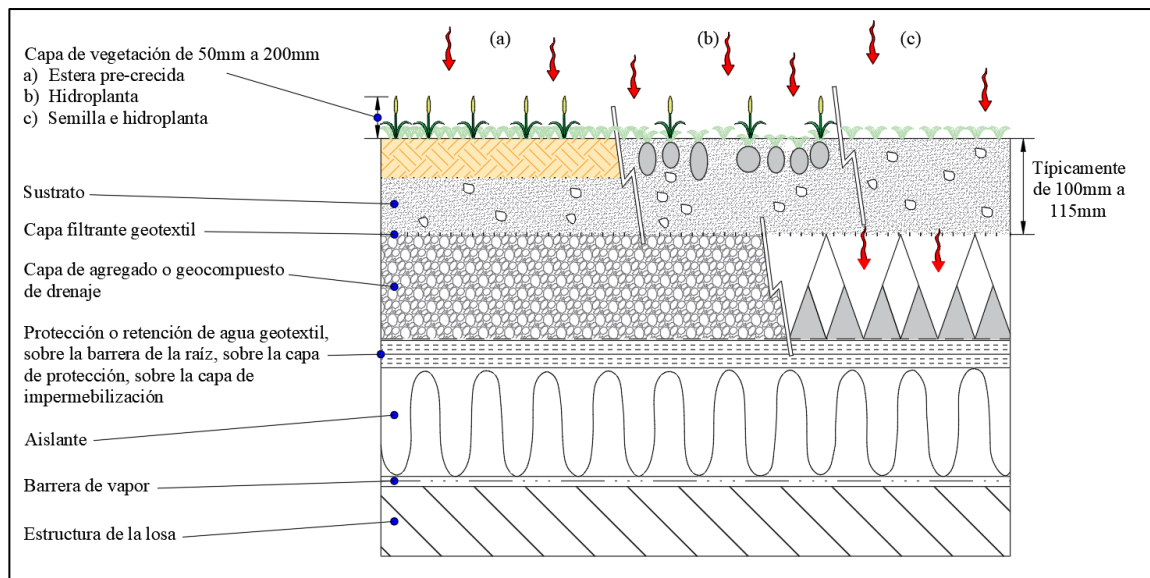


Figura 2.1. Componentes típicos de un techo verde (Fuente: Adaptado de (Wilson, Bray, & Cooper, 2004)).

La implementación de la estructura y los elementos de los techos verdes es fundamental para su correcto funcionamiento. Dentro de ellos, se puede utilizar diferentes tipos de sustratos, de vegetación, de tipo de drenaje o capa filtrante, para hacer más eficiente el sistema. Siguiendo estas condiciones, en esta investigación se aplicaron para los prototipos de techos verdes extensivos, buscando el mejor rendimiento del proyecto.

2.1.3. Tipos de techos verdes

Las técnicas de techos verdes involucran una estructura tal que cumpla la capacidad de drenar el agua de lluvia, evitar que las raíces penetren la estructura del techo del edificio, tenga la menor carga posible, entre otras funciones. Esta estructura puede tener variaciones en el tipo de sustrato, el tipo de vegetación, el tipo de drenaje, dependiendo del objetivo del sistema. Asimismo, cabe mencionar, que existen 2 clasificaciones principales de techos verdes: techos verdes extensivos y techos verdes intensivos.

Los techos verdes extensivos cubren toda un área con plantas de bajo crecimiento. Usualmente, tienen una profundidad de sustrato baja, que es menor a 20 centímetros, lo que permite aplicar plantas que no crecen de manera considerable, manteniendo menor riego de la vegetación y menores mantenimientos poco frecuentes (Jim &

Tsang, 2011). Al mismo tiempo, permite que sean autosostenibles y que sean más livianos y rentables para aplicarse fácilmente en edificios (Wilson et al., 2004).

Por otro lado, los techos verdes intensivos, tienen profundidades de sustratos mayores a los 20 centímetros, porque este tipo de techo verde, tiene vegetaciones con alturas grandes, incluyendo jardineras o árboles. Este tipo de vegetación permite grandes beneficios ambientales, incluso mayores a los techos verdes extensivos, pero por este mismo motivo, es menormente instalados en una zona urbano, ya que, requieren mayor mantenimiento, riego y cargas mucho mayores a los extensivos (Jim & Tsang, 2011; Porcaro et al., 2019).

Los techos verdes extensivos exigen menor cantidad de mantenimiento, menores requisitos de carga por parte del edificio, plantas con menor tamaño, menores requerimientos de riego, entre otras cualidades que son apropiadas para su selección. Considerando estas características, es el motivo por el que se seleccionaron los techos verdes extensivos como una opción viable, que pueden adaptarse con mayor facilidad a las condiciones urbanas del área en cuestión (municipio de San Nicolás de los Garza).

2.1.4. Beneficios ambientales

Retención del agua pluvial para reducir gastos picos en tormentas

(Beecham & Razzaghmanesh, 2015) Con los resultados obtenidos muestran una retención mínima de agua de 52% y máxima del 95% cuando se tiene vegetación y, una retención mínima de agua de 31% y máxima del 65% cuando no se tiene vegetación, debido a que la evotranspiración favorece la retención del agua.

Por otra parte, enfocado en la cantidad de agua de los techos verdes, Palla & Gnecco (2015) realizó una investigación enfocada en un modelo matemático en el programa EPA Storm Water Management Model (SWMM) para la simulación de la cuenca hidrológica, donde se simularon techos verdes y pavimentos permeables en los eventos de lluvia para los períodos de retorno de 2, 5 y 10 años. El modelo se calibró en EPA SWMM con resultados de pruebas de laboratorio de la infiltración del agua con los SUDS. Como resultados se obtuvo que la reducción del Área Impermeable Efectiva (EIA) afecta

principalmente la reducción del pico, se requiere una reducción de la EIA superior al 5% para obtener beneficios hidrológicos notables. También, se obtuvo que el rendimiento hidrológico aumenta linealmente al aumentar los porcentajes de reducción de EIA, en cuanto a los gastos pico se disminuyeron en un factor de 0.10-0.45, 0.10-0.21 y 0.09-0.31, para un Tr de 2, 5 y 10 años, respectivamente. Además, se demostró que la modelación en EPA SWMM puede usarse adecuadamente para evaluar el desempeño de los techos verdes y, para apoyar su implementación generalizada a escala de cuenca urbana.

Mejoramiento de la calidad del agua pluvial

Carpenter, Todorov, Driscoll, & Montesdeoca (2016), instalaron un techo verde en Syracuse CoE, Syracuse, NY, con un área total de 1,190 m². Ellos se enfocaron en la medición de la cantidad de Nitrógenos Totales (NT), Fósforos Totales (FT) y los Carbonos Orgánicos Disueltos (COD), además de la cantidad de agua que puede retener. Con los resultados, obtuvieron una retención mínima de agua 88% y una retención máxima del 95%. Además, obtuvieron que el techo verde puede retener NT, FT y COD en un 96.8%, 97.6% y 71.4%, respectivamente en temporadas de no crecimiento de las plantas; por otro lado 52.4%, 74.5% y -347.1%, respectivamente, para temporadas de crecimiento. En esta investigación se tuvieron resultados favorables para la cantidad y calidad de agua (a excepción de los COD en temporada de crecimiento).

Por otro lado, Liu et al. (2019), se enfocó únicamente en la calidad del agua, realizando mediciones de NT, FT y Sólidos Suspendidos Totales (SST), en 10 prototipos de techos verdes de 1.00 x 1.00 metros, utilizando diferentes tipos de plantas y sustratos. A diferencia de Carpenter et al. (2016), se menciona que el techo verde fue una fuente de NT, FT y SST. En los resultados obtenidos, se observa que mientras menor sea el sustrato del techo verde emite menores cantidades de nutrientes, además que se puede evitar la emisión de SST si se mejora la capa filtrante, para una mayor retención de ellos.

En el caso de Beecham & Razzaghmanesh (2015), utilizó 16 prototipos de techos verdes, donde 12 de ellos tienen vegetación y 4 son sin vegetación; cada uno se agruparon para utilizar diferentes pendientes, plantas, sustratos y profundidades de sustrato.

Se midió la retención de agua, el pH, turbiedad, conductividad eléctrica, TDS, Nitratos, Nitritos, Amonios, Ortofosfatos, Potasio, Sodio, Magnesio y Calcio. Con los resultados obtenidos muestran una retención mínima de agua de 52% y máxima del 95% cuando se tiene vegetación y, una retención mínima de agua de 31% y máxima del 65% cuando no se tiene vegetación, debido a que la evotranspiración favorece la retención del agua. En cambio, con la calidad del agua, se obtuvo que los techos verdes se comportaron como una fuente de nutrientes, como lo son Nitratos, Nitritos, Amonios, Ortofosfatos, Potasio, Sodio, Magnesio y Calcio, pero los techos que mostraban mejor comportamiento eran los que tenían vegetación.

Mejoramiento de la calidad del aire

Además de los beneficios que se observan directamente en los techos verdes como lo es el mejoramiento de la calidad de agua y la capacidad de retención del agua pluvial, Chen, Lu, Yuan, Xu, & Yang (2015), cuantificaron el potencial de almacenamiento de carbono de los techos verdes extensivos. Los autores mencionan que, por medio de la fotosíntesis, los techos verdes son capaces de remover el dióxido de carbono de la atmosfera y retenerlo como biomasa. En los resultados se observa que de acuerdo al tipo de planta será la capacidad de retención de carbono por metro cuadrado. El contenido de carbono del sustrato promedió 913 g C/m^2 , sin efecto de especie, lo que representa una tasa de retención de 100 g C/m^2 durante los 2 años de este estudio. El sistema de techos verdes capturó 375 g C/m^2 en biomasa aérea y subterránea y materia orgánica del sustrato.

Por otro lado, Speak, Rothwell, Lindley, & Smith (2012), se enfocaron en obtener la cantidad de partículas menores a $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}). Las partículas al tener un diámetro tan pequeño, pueden penetrar en el sistema pulmonar de los seres humanos y causar problemas en la salud, por la inhalación de metales. En el estudio se encontró que los techos verdes actúan como filtros pasivos de material particulado del aire. Los techos verdes extensivos no tienen una eficiencia tal como la de los árboles que se encuentran en la calle debido a su tamaño, pero se pueden considerar como medida de remediación de la contaminación del aire urbano. En la investigación se obtuvo que se retiraron 0.21 toneladas de PM_{10} al año del centro de la ciudad de Manchester, lo cual equivale al 2.3%

de las entradas de PM₁₀ en esta área. Mencionan que se pueden eliminar cantidades mayores con techos con césped incluido.

Reducción de ruido

Otro de los factores que los techos verdes tienen ventaja, es en la atenuación del ruido en un edificio. Van Renterghem & Botteldooren (2014), realizaron una investigación en la que colocaron un altavoz y dos micrófonos para captar el ruido del edificio en estudio. Se menciona que los techos verdes pueden ser un factor importante para la reducción del ruido por el tráfico en los vehículos, es por esto que decidieron colocar de esa manera los sensores de sonido. También mencionan que la influencia de la lluvia y la humedad en el sustrato son precisamente entre 250 Hz y 1250 Hz. Asimismo, se menciona que la diferencia de atenuación de ruido de un sustrato seco a uno húmedo varía hasta 10 dB, y de acuerdo a los datos medidos, el impacto de la humedad en el sustrato, se puede reducir el nivel acústico del tráfico vial en 2 dBA.

Por otro lado Connelly & Hodgson (2013), se enfocaron en la disminución del ruido pero desde una perspectiva dentro del edificio hacia fuera del edificio mediante la medición en laboratorio de la transmisión de sonido. Los techos verdes medidos de diferentes profundidades de sustratos, contenido de agua y especies de plantas, muestran que la pérdida de transmisión de ruido es mayor a comparación con los que no cuentan con vegetación por hasta 10 y 20 dB en los rangos de frecuencia baja y media, respectivamente. Asimismo, mencionan que esto es una gran ventaja arquitectónica, ya que, puede ser una solución material para reducir la transmisión de fuentes de ruido a través de la envolvente del edificio.

Beneficios sociales

De acuerdo a Zhang, Shen, & Wu (2011), mencionan que el desarrollo de proyecto residenciales en las zonas urbanas tienen diferentes retos y estrategias innovadoras a tomar en cuenta. Es por esto, que los desarrolladores urbanos mencionan que aplicar estrategias verdes y sostenibles conlleva varias barreras, pero a pesar de estas barreras, aun se

opta por la estrategia del desarrollo verde. Esto es debido a ventajas competitivas y sociales, de los cuales, los techos verdes se destacan en la contribución a la reducción de energía y costos de mantenimiento; los autores mencionan que en China, se pueden obtener menores costos en el uso de suelo, así como beneficios fiscales; también obtienen menores costos en la construcción por aplicar tecnologías verdes; asimismo, los desarrolladores tienen una mejor reputación por desarrollar proyectos sostenibles; tienen ventajas en los costos de operación y mantenimiento; y, al implementar techos verdes puede ayudar a los desarrolladores a obtener más canales de financiamiento para el desarrollo de propiedades.

En Melbourne, Australia, se realizó una investigación por Williams et al. (2019), donde se plantea el cuestionamiento de los beneficios psicológicos de la implementación de techos verdes. A la falta de investigaciones en este sector, los autores toman en cuenta que en algunos edificios el acceso a los techos verdes es limitado, por lo que el aspecto psicológico también se limita. Pero las edificaciones que si lo tienen pueden crear mejoramientos en los aspectos físicos (creando un ambiente más ameno y estético), clima social (instalación de plantas, temperaturas más cómodas, niveles más bajos de ruido, diseños verdes, entre otras), actividades que intervienen los techos verdes (como realizar ejercicio, áreas sociales y relajación) y permitir la adaptación individual al entorno cambiante.

Beneficios en consumo de energía y económicos

Uno de los temas más relevantes en la temperatura es relacionado al consumo de energía. El consumo de energía por parte de los edificios varía en cada parte del mundo, pero es indiscutible que el consumo por parte de edificios es una parte fundamental. Con base en esto, los techos verdes vienen como una alternativa para reducir estos consumos. Silva, Gomes, & Silva (2016), realizan una investigación en Lisboa, Portugal, donde implementan 3 tipos de techos verdes (extensivo, semi-intensivo e intensivo), para estimar el consumo de energía que sería si se implementara un techo verde. Esta investigación se realizó por medio de experimentación y una modelación matemática, donde obtuvieron que los techos verdes extensivos requieren 20% menos de energía que un techo con-

vencional negro, comportándose similarmente a un techo blanco. Los que tuvieron mayor impacto en el consumo de energía fueron los techos verdes semi-intensivo e intensivo, los cuales requirieron 60-70% y 45-60% menor energía que un techo convencional negro y blanco, respectivamente.

Por otro lado, Chan & Chow (2013), realizaron una experimentación sobre el comportamiento de los sistemas de techos verdes en un edificio comercial, para posteriormente, realizar una modelación por el programa EnergyPlus. En esta investigación, se realizó una evaluación considerando los consumos de energía que se tendrán en 3 periodos futuros (2011-2030, 2046-2065 y 2080-2099). En esto se consideró los efectos de que la urbanización tendrá en los años posteriores, tomando en cuenta estimaciones de condiciones climáticas futuras. Los resultados que obtuvieron mencionan que en las condiciones climáticas futuras de los años entre 2011-2030 y 2046-2065, para ambos consumos puede variar entre -13.7% a 5.9% menos a los techos convencionales. Asimismo, se menciona que, con esto último, ayuda a tener un costo de recuperación de la inversión de los techos verdes, en un período de 10 años.

Cabe mencionar que el implementar tecnologías verdes en el desarrollo urbano, tiene el potencial de crear un valor ambiental en un edificio, lo que promueve iniciativas sostenibles y conlleva beneficios a los desarrolladores urbanos, así como un entorno más ameno con los que utilizan el edificio. También, para incentivar la cultura ambiental debido a los problemas ambientales por la gran cantidad de área de materiales de concreto y pavimento, México ha entrado a la iniciativa de otorgar un beneficio fiscal del 10% en algunos estados de la República Mexicana la reducción del impuesto del predial a las personas físicas que cuenten con un inmueble de uso habitacional y que instalen voluntariamente el sistema de techos verdes en el estado de México (Secretaría del Medio Ambiente, 2017).

2.2. ANÁLISIS DE LA VARIANZA

El análisis de varianza (ANOVA) de un factor es un método estadístico para examinar las diferencias en las medias de tres o más grupos, en otras palabras, prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente (Sahoo, 2015).

El método que empleamos se denomina “análisis de varianza de un factor (o análisis de varianza de una entrada)” porque empleamos una sola propiedad o característica para categorizar las poblaciones. En ocasiones a esta característica se le llama “tratamiento o “factor”, el cual, es una propiedad o característica que nos permite distinguir entre sí a las distintas poblaciones. Cuando concluimos que existe suficiente evidencia para rechazar la aseveración de medias poblacionales iguales, no podemos concluir a partir del ANOVA que cualquier media en particular es distinta de las demás (Freund, Miller, & Miller, 2000).

CALCULO DE F CON MUESTRAS IGUALES

De acuerdo a Triola (2009) suponiendo que las poblaciones tienen la misma varianza, el estadístico de prueba F es la razón o el cociente de los siguientes dos estimados de la varianza: 1. La variación entre muestras (con base en las varianzas muestrales). 2. Variación dentro de muestras (con base en las varianzas muestrales). Un estadístico de prueba F significativamente grande constituye evidencia en contra de medias poblacionales iguales. Esto se representa por la ecuación (2-1).

$$F = \frac{\text{varianza entre las muestras}}{\text{varianza dentro de las muestras}} = \frac{nS_x^2}{S_p^2} \quad (2-1)$$

El numerador del estadístico de prueba F mide la variación entre medias muestrales. El estimado de la varianza en el denominador depende únicamente de las varianzas muestrales y no se ve afectado por las diferencias entre las medias muestrales. Como consecuencia, las medias muestrales que tienen valores cercanos dan como resultado

un estadístico de prueba F pequeño y concluimos que no existen diferencias significativas entre las medias muestrales. Pero si el valor de F es excesivamente grande, entonces se rechaza la aseveración de igualdad de medias.

El valor crítico de F se calcula suponiendo una prueba de cola derecha, ya que los valores grandes de F corresponden a diferencias significativas entre medias. Con k muestras, cada una con n valores, el número de grados de libertad se obtienen con la ecuación (2-2):

Grados de libertad: ($k = \text{número de muestras}$ y $n = \text{tamaño muestral}$) (2-2)

- Grados de libertad del numerador = $k - 1$
- Grados de libertad del denominador = $k(n - 1)$

CALCULO DE F CON MUESTRAS DESIGUALES

De acuerdo a Triola (2009) mientras que los cálculos requeridos para los casos con tamaños muestrales iguales son razonables, las cosas se complican bastante cuando los tamaños muestrales no son iguales. Se aplica el mismo razonamiento básico, porque calculamos un estadístico de prueba F que es el cociente de dos estimados diferentes de la varianza poblacional común σ^2 , pero esos estimados implican medidas ponderadas que toman en cuenta los tamaños muestrales, tal como se indica con la ecuación (2-3):

$$F = \frac{\text{varianza entre muestras}}{\text{varianza dentro de muestras}} = \frac{\left[\frac{\sum n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2}{k - 1} \right]}{\left[\frac{\sum (n_i - 1) s_i^2}{\sum (n_i - 1)} \right]} \quad (2-3)$$

Donde:

- \bar{x} = media de todos los valores muestrales combinados
- k = número de medias poblacionales que se están comparando
- n_i = número de valores de la i -ésima muestra
- \bar{x}_i = media de los valores en la i -ésima muestra
- s_i^2 = varianza de los valores en la i -ésima muestra

Como el cálculo de este estadístico de prueba puede conducir grandes errores de redondeo, los diferentes programas estadísticos de cómputo suelen emplear una expresión distinta que implica la notación de la suma de cuadrados (SC) y los cuadrados medios (CM). La idea básica es que el estadístico de prueba F es una razón con un numerador que refleja la variación entre las medias de las muestras y un denominador que refleja la variación dentro de las muestras. Si las poblaciones no son iguales, el cociente F tiende a ser significativamente grande (Triola, 2009). A continuación, se describen los componentes más importantes del método ANOVA:

La SC (total) o suma total de cuadrados es una medida de la varianza total \bar{x} en todos los datos muestrales combinados (ver ecuación (2-4)).

$$SC(total) = \sum (x - \bar{x})^2 \quad (2-4)$$

La SC (total) se puede separar en los componentes de la SC (del tratamiento) y la SC (del error), descritas como sigue:

La SC (del tratamiento), también llamada SC (del factor), SC (entre grupos) o SC (entre muestras), es una medida de la variación entre las medias muestrales (ver ecuación (2-5)).

$$\begin{aligned} SC(del\ tratamiento) &= n_1(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + n_2(\bar{x}_2 - \bar{x})^2 + \dots + n_k(\bar{x}_k - \bar{x})^2 \\ &= \sum n_i(\bar{x}_i - \bar{x})^2 \end{aligned} \quad (2-5)$$

La SC (del error) también conocida como SC (dentro de grupos) o SC (dentro de muestras), es una suma de cuadrados que representa la variación que se supone común a todas las poblaciones consideradas (ver ecuación (2-6)):

$$SC(del\ error) = (n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2 + \dots + (n_k - 1)s_k^2 = \sum (n_i - 1)s_i^2 \quad (2-6)$$

Dadas las expresiones anteriores para la SC (total), SC (del tratamiento) y SC (del error), siempre deben mantenerse las siguientes relaciones (ver ecuación (2-7)):

$$SC(total) = SC(del\ tratamiento) + SC(del\ error) \quad (2-7)$$

SC (del tratamiento) y SC (del error) son ambas sumas de cuadrados, y si dividimos cada una de ellas entre su número correspondiente de grados de libertad, obtenemos los cuadrados medios. Algunas de las siguientes expresiones para los cuadrados medios incluyen la notación N (número total de valores en todas las muestras combinadas).

CM (del tratamiento) es un cuadrado medio de tratamiento, que se obtiene como sigue (ver ecuación (2-8)):

$$CM(\text{del tratamiento}) = \frac{SC(\text{del tratamiento})}{k - 1} \quad (2-8)$$

CM (del error) es un cuadrado medio del error, que se obtiene como sigue (ver ecuación (2-9)):

$$CM(\text{del error}) = \frac{SC(\text{del error})}{N - k} \quad (2-9)$$

CM (total) es un cuadrado medio de la variación total, que se obtiene como sigue (ver ecuación (2-10)):

$$CM(\text{total}) = \frac{SC(\text{total})}{N - 1} \quad (2-10)$$

Al contrastar la hipótesis nula $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ con la hipótesis alternativa de que no todas estas medias son iguales, el estadístico de prueba (ver ecuación (2-11)):

$$F = \frac{CM(\text{del tratamiento})}{CM(\text{del error})} \quad (2-11)$$

Tiene una distribución F (cuando la hipótesis nula H_0 es verdadera) con grados de libertad dados por:

Grados de libertad del numerador = $k - 1$

Grados de libertad del denominador = $N - k$

De esta manera, serán aplicados estos conceptos del análisis de varianza con la evaluación a nivel micro escala por medio de experimentación de los Prototipos de Techos Verdes Extensivos (PTVE). Este proceso se facilita con las herramientas con las que

cuenta Excel, proporcionando los resultados de la evaluación de la varianza por el método ANOVA. Con esto, se puede observar en qué medida, las varianzas muestrales se comportan para el PTVE con mejor rendimiento crítico, comparándolo con los datos recopilados de temperaturas de un techo convencional.

2.3. ENVI-MET

ENVI-met es un software que simula el clima en zonas urbanas evaluando los efectos de la atmósfera, de la vegetación, de la arquitectura y materiales de construcción. El software tiene el fin de analizar de manera científica y reconocida los impactos de diferentes escenarios de planificación (ENVI-met, 2021). De acuerdo al soporte técnico del Software, se debe conocer principalmente en qué consiste su arquitectura, el modelo atmosférico, el entorno construido y sistema de construcción, el procesamiento interno del programa y las aplicaciones del mismo. Esto se ve reflejado con los siguientes apartados.

2.3.1. Arquitectura del modelo ENVI-met

ENVI-met es un modelo no hidrostático tridimensional holístico para la simulación de interacciones superficie-planta-aire no solo limitado a, sino que se utiliza muy a menudo para simular entornos urbanos y evaluar los efectos de las visiones de la arquitectura verde. Está diseñado para microescala con una resolución horizontal típica de 0,5 a 10 micras un marco de tiempo típico de 24 a 48 horas con un intervalo de tiempo de 1 a 5 segundos. Esta resolución permite analizar interacciones a pequeña escala entre edificios, superficies y plantas individuales.

El cálculo del modelo incluye:

- Flujos de radiación de onda corta y larga con respecto al sombreado, la reflexión y la radiación de los sistemas de construcción y la vegetación
- Transpiración, evaporación y flujo de calor sensible de la vegetación al aire, incluida la simulación completa de todos los parámetros físicos de la planta (por ejemplo, tasa de fotosíntesis)

- Cálculo dinámico de la temperatura superficial y de la temperatura de la pared para cada elemento de fachada y techo que soporta hasta 3 capas de materiales y 7 puntos de cálculo en la pared/techo.
- Intercambio de agua y calor dentro del sistema del suelo, incluida la absorción de agua de la planta.
- Representación 3D de la vegetación, incluido el modelado dinámico del balance hídrico de las especies individuales.

2.3.2. Modelo atmosférico

Modelo de viento: incluye un modelo 3D de dinámica de fluidos computacional (CFD) completo. Resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes no hidrostáticas promediadas por Reynolds para cada cuadrícula en el espacio y para cada paso de tiempo. Los efectos de la vegetación se incluyen como fuerzas de arrastre en el campo de viento. Para una simulación detallada de la física del edificio, se calcula el flujo de viento cerca de cada segmento de fachada y techo. Con la nueva función Single Wall, también se pueden simular los patrones de viento dentro de estructuras complejas o semiabiertas.

Temperatura y humedad del aire: La temperatura del aire y la humedad específica del aire están determinadas por las diferentes fuentes y sumideros de calor y vapor sensibles dentro del dominio del modelo. Sobre la base del campo de viento tridimensional calculado, se simula la advección y la difusión en el aire. La superficie del suelo y las hojas de la vegetación actúan como fuentes o sumideros de temperatura y humedad en el modelo de atmósfera. Las paredes y los techos de los edificios actúan principalmente como superficies que intercambian calor con la atmósfera, pero también pueden actuar como fuentes de humedad si se aplica ecologización de fachadas o tejados.

Flujos radiativos: ENVI-met contiene módulos de análisis recientemente desarrollados para modelar los flujos de radiación de onda corta y de onda larga dentro de entornos complejos. El esquema tiene en cuenta el sombreado por geometrías complejas,

reflejos por diferentes superficies y materiales de construcción y el efecto de la vegetación en todos los flujos radiativos.

Temperatura de la superficie y del suelo: La temperatura de la superficie y la distribución de la temperatura del suelo se calcula para suelos naturales y para materiales de sellado artificial hasta una profundidad de -4 m. Para cada capa de rejilla vertical se puede elegir un suelo o material de sellado diferente para simular diferentes estructuras de suelo. La conductividad térmica de los suelos naturales se calcula con respecto al contenido real de agua del suelo.

Geometría de plantas en 3D: ENVI-met admite plantas verticales simples como el césped o el maíz, pero también permite geometrías de vegetación en 3D complejas, como árboles grandes. Todas las plantas se tratan como especies individuales con un control integrado del equilibrio hídrico y un concepto de reacción al estrés hídrico y térmico.

Temperatura de vegetación: La temperatura de las hojas se calcula resolviendo el balance energético de la superficie de la hoja con respecto a las condiciones meteorológicas y fisiológicas de la planta reales para cada cuadrícula del dosel de la planta.

2.3.1. Entorno construido y sistema de construcción

La geometría de edificios completamente 3D y paredes simples de los edificios complejos y otras estructuras se pueden construir en 3D completo sin limitaciones de complejidad en la medida en que lo permita la estructura de base cúbica. Esto permite la simulación de espacios semiabiertos. Además, ENVI-met Expert permite el uso de paredes delgadas simples que se pueden aplicar a cualquier cuadrícula que se puede usar para representar espacios que están encerrados por paredes.

Para modelar la geometría de los edificios, en el modo de diseño detallado, ENVI-met permite asignar tipos de pared individuales a cada pared y superficie de techo. Los tipos de pared pueden estar compuestos por 3 capas de diferentes materiales con pro-

propiedades físicas individuales, como la transmisión de la radiación solar, la capacidad térmica o la conductividad térmica. Los diferentes materiales de paredes y techos se pueden diseñar gráficamente utilizando el Administrador de bases de datos.

Para la física de los edificios, cada segmento de pared y techo en ENVI-met está representado por su propio modelo termodinámico que consta de 7 nodos de cálculo de pronóstico. La temperatura del nodo exterior se actualiza continuamente con respecto a las variables meteorológicas en la fachada y el estado térmico de los edificios y otros objetos dentro del rango de visión del elemento fachada / cubierta considerado. El estado térmico de los nodos de la pared interior se calcula a partir de las propiedades físicas asignadas a la pared / techo según la ley de conducción de calor de Fourier.

El sistema de techos y muros verdes ENVI-met Expert permite una simulación detallada de los procesos de intercambio de energía y vapor que tienen lugar en muros y techos verdes. El Green Wall System (GWS) se integra a la perfección en el cálculo dinámico del rendimiento energético del edificio y la temperatura de la fachada / pared y admite una amplia gama de sistemas diferentes, desde simples plantas trepadoras hasta sistemas de paredes vivas.

Por último, el rendimiento energético del edificio ENVI-met calcula dinámicamente el desarrollo de la temperatura interior del edificio como resultado de los flujos entrantes y salientes a través de los segmentos de techo y pared asociados. Esta simulación de energía del edificio se ejecuta en paralelo a la simulación de microclima exterior para cada edificio en el dominio del modelo, de modo que se proporcione una retroalimentación constante entre las condiciones climáticas exteriores e interiores y de las interacciones entre edificios. La versión reciente permite un modelo de zonificación inicial para definir secciones de edificios y zonas térmicas.

2.3.2. Procesamiento interno del programa

El lenguaje de programación de ENVI-met está codificado en Object Pascal, para WINDOWS usando DELPHI.

El esquema de discretización numérica ENVI-met utiliza una rejilla en C ortogonal Arakawa para representar su entorno. La topografía se incluye marcando las celdas como llenas de tierra. Como consecuencia de este esquema, ENVI-met solo permite estructuras rectas y rectangulares. Para la superficie del suelo, la exposición e inclinación exactas se tienen en cuenta para los cálculos del balance energético. Para paredes y techos de edificios, las superficies inclinadas o con curvas deben aproximarse mediante puntos de cuadrícula.

Métodos numéricos ENVI-met utiliza el método de diferencias finitas para resolver la multitud de ecuaciones diferenciales parciales (PDE) y otros aspectos del modelo. El esquema es en parte implícito, en parte explícito según el subsistema analizado. Las ecuaciones de difusión y advección atmosférica se implementan en un esquema totalmente implícito, lo que permite que ENVI-met utilice pasos de tiempo relativamente grandes permaneciendo aun numéricamente estable.

2.3.3. Aplicaciones ENVI-met

Headquarter: Headquarter de ENVI-met permite un fácil acceso a los programas dentro de ENVI-met Suite. Desde aquí, puede navegar a todos los programas que pueda necesitar en el proceso, desde configurar su proyecto, crear sus materiales de base de datos personalizados, digitalizar el área de modelo y finalmente comenzar la simulación y evaluar los resultados. Se divide en cuatro pestañas: “ENVI-met V4, Data and Settings, System, y por último, Interactive”.

Manage Workspaces and Projects: En esta sección, se permite configurar el espacio de trabajo ENVI-met, es decir, la ruta del directorio en el que se encuentran las carpetas de su proyecto. Dentro de las carpetas del proyecto, se guardarán los archivos de simulación respectivos, la base de datos del proyecto y los resultados de la simulación.

Monde WorldEditor: El programa Monde es el editor mundial de ENVI-met Suite que permite digitalizar el área del modelo basado en vectores antes de exportarlo a un archivo *.INX basado en ráster.

Spaces: El programa Spaces de ENVI-met Suite hace posible digitalizar el área de modelo basado en ráster directamente en el programa u optimizar el área de modelo previamente creada en Monde u otros programas.

ENVIguide: La ENVIguide, en la versión anterior de ENVI-met conocida como Project Wizard, es una guía a través del proceso de creación de un archivo de simulación (*.SIMX) que es necesaria para comenzar la simulación del proyecto. Combina todos los procesos y permite configurar los archivos de simulación según las necesidades.

LEONARDO 4: Esta es la parte del programa donde se analizan los datos generados a partir de las secciones previamente realizadas para la generación del modelo. Aquí se tiene una visualización de los resultados de “agentes, atmosféricos, edificios, ENVIobjects, radiación, receptores, suelo, superficie y vegetación”.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. DISEÑO Y ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

Dado que el objetivo del estudio fue realizar una evaluación a nivel micro y macro escala del desempeño térmico de los techos verdes extensivos en un ambiente urbano, se recurrió a un diseño experimental y por modelación. Al tener un sustento teórico suficiente de la investigación, se procedió a realizar una investigación del tipo experimental con alcance correlacional para conocer a detalle el comportamiento térmico de los techos verdes extensivos en relación con los techos convencionales.

De esta manera, se desarrolló la metodología, tomando los aspectos de experimentación y correlacional para obtener conclusiones del comportamiento de los techos verdes con relación a los techos convencionales. Siendo así, se diseñó la forma de trabajo bajo el planteamiento metodológico del enfoque cuantitativo, puesto que es el que mejor se adapta a las características y necesidades de la investigación (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010).

3.2. ÁREA DE ESTUDIO

La investigación realizada constó de un análisis a nivel micro y macro escala, siendo ambas desarrolladas en el municipio de San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México (ver figura 3.1). Este se encuentra ubicado a los 25°46' de latitud norte y 100° y 17' de longitud oeste, con un área territorial de 60,115,235.38 m², y teniendo el nivel de su cabecera municipal a 512 m.s.n.m. Cuenta con una población de 443,031 habitantes, ocupando el segundo lugar del índice de desarrollo humano en Nuevo León.

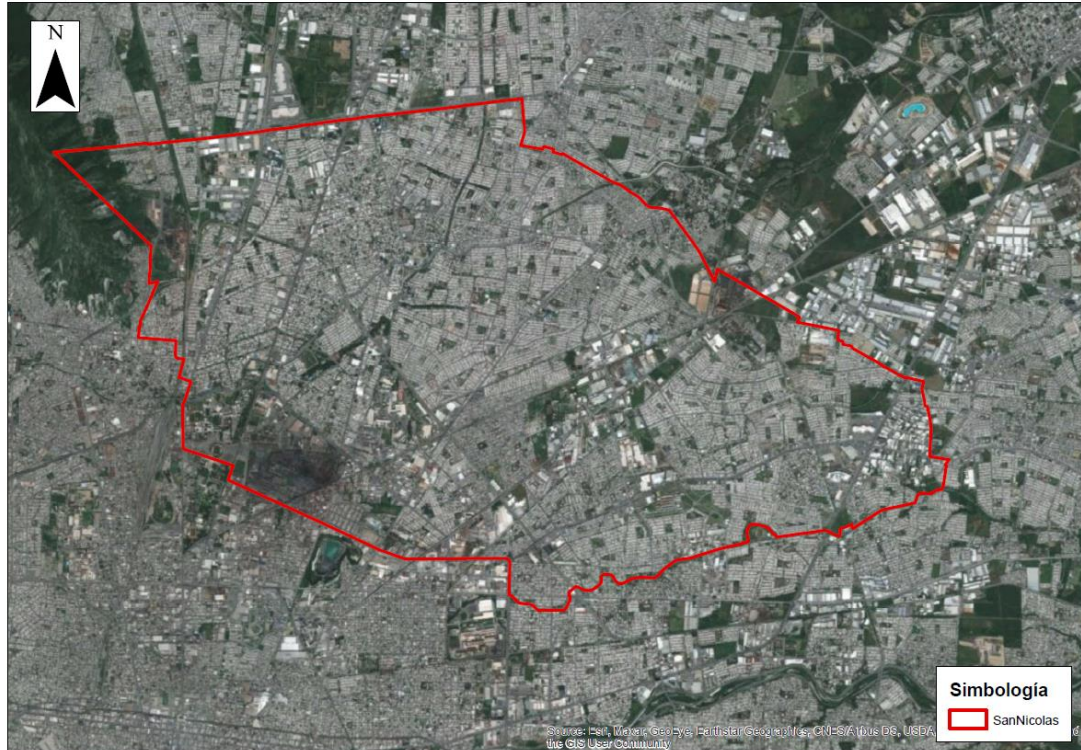


Figura 3.1. Imagen satelital del municipio de San Nicolás, de los Garza, Nuevo León (Fuente: Elaboración propia con datos de (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2021).

Las condiciones del uso de suelo en el municipio, es un factor muy importante, ya que, con base en ello, se representa la cantidad de área urbanizada y el aprovechamiento que se puede tener para los techos verdes (Asadi et al., 2020). En la figura 3.1, se observó que el municipio en cuestión se encuentra mayormente urbanizado, dejando pocos espacios verdes y construyendo casi toda el área. Las áreas comerciales, las áreas domésticas y las industriales, representan el 62.06%, 36.82% y 1.12%, respectivamente, del área total del municipio, asimismo, toda la urbanización conforma el 73.06% del área total. Esto lo vemos representado por la tabla 3.1, asimismo, por la figura 3.2, se representa estas áreas, de manera visual por medio de un mapa.

Tabla 3.1. Área del uso urbano del municipio de San Nicolás de los Garza, Nuevo León (fuente: SADM, 2020).

Uso urbano	Área (m ²)	Área (%)
Comercial	27,259,830.89	62.06%
Domestico	16,171,790.64	36.82%
Industrial	492,434.38	1.12%
Total General	43,924,055.91	100.00%

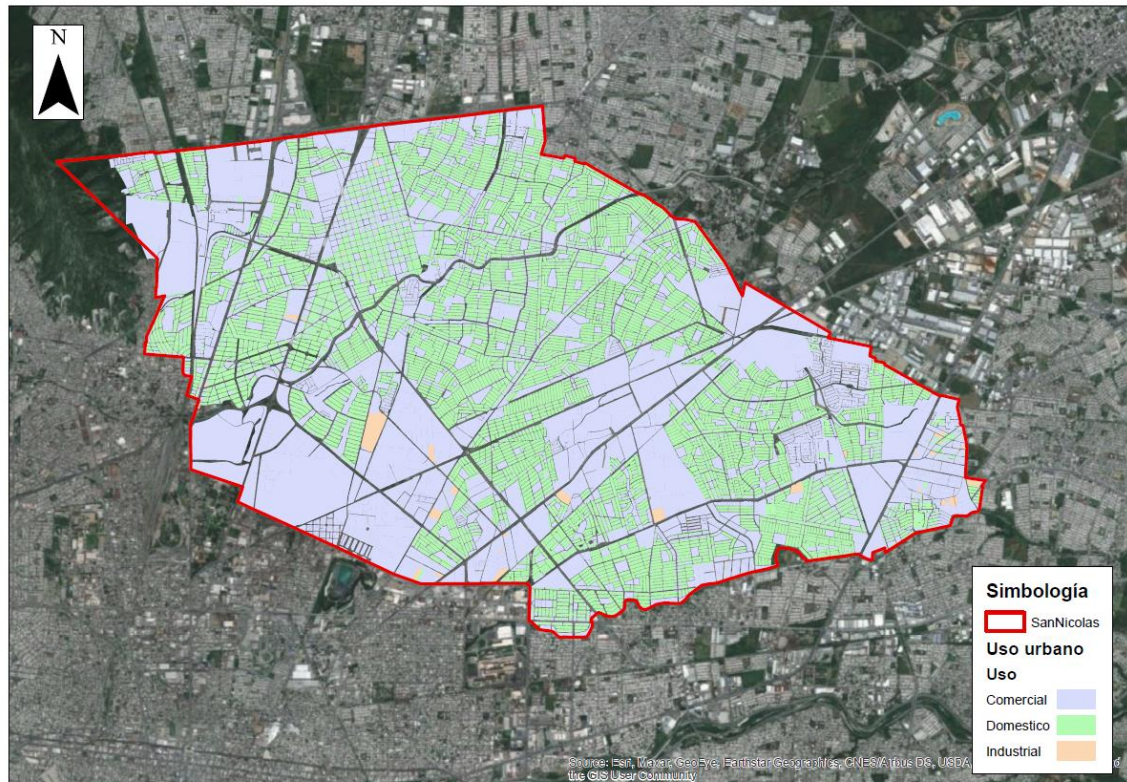


Figura 3.2. Uso urbano de los espacios construidos en el municipio de San Nicolás de los Garza, Nuevo León (Fuente: Elaboración propia con datos de (SADM, 2020)).

Otro factor a tomar en cuenta es el tipo de clima que se presenta en el municipio. De acuerdo a información de tipo shapefile, obtenida por medio del geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), observamos que se cuenta con un clima Semicálido subhúmedo del grupo C [“(A)C(wo)x’], lo que representan temperaturas medias anuales mayores de 18°C, siendo la temperatura del mes más frío menor de 18°C, y la temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. En la figura 3.3, se representa por medio de tonos los tipos de climas para el territorio mexicano, dando un acercamiento al municipio de estudio.

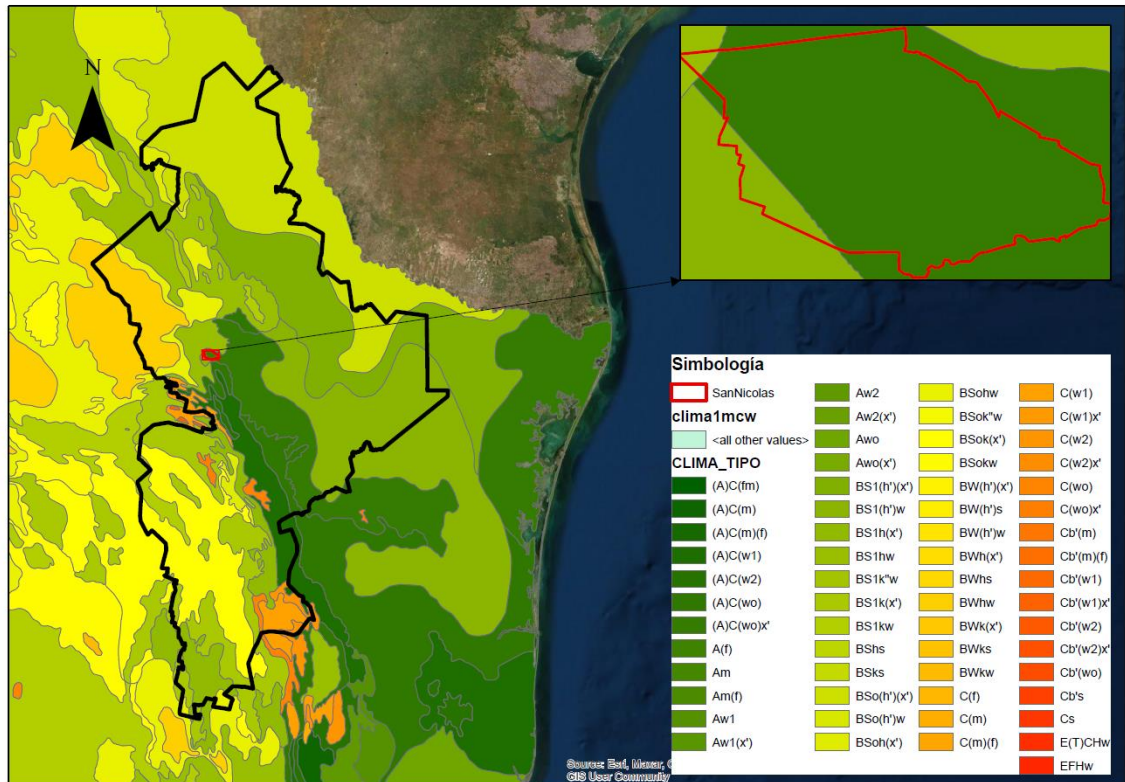


Figura 3.3. Mapa del tipo de clima de acuerdo a la clasificación Koppen modificada por Enriqueta García a partir de 1964 (Fuente: Elaboración propia con datos de (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2021)..

Las temperaturas presentadas en el estado de Nuevo León varían en toda su área, per particularmente en el área de estudio se tomaron en cuenta los datos que se encuentra en la estación climatológica 19061 "Topo chico", la cual se encuentra ubicada en las coordenadas Longitud: 100° 18' 29.8" y Latitud: 25° 43' 56.6". Estando a 300 metros de distancia del lugar de estudio a nivel micro escala y a 1.14 metros de distancia al estudio a nivel macro escala.

Se comentó en el apartado 1.1.1, los incrementos de temperaturas máximas globales y el comportamiento de la temperatura de la estación climatológica 19061 "topo-chico" (ver figura 1.4), donde observamos que las temperaturas medias obtenidas desde el año 1960 al 2020, se mantienen entre 13°C (2005) y 24°C (2017). Por su parte la temperatura máxima que se ha presentado en la estación es de 43°C (2019) y la mínima de -9°C (2005).

Por otro lado, la precipitación del municipio de San Nicolás de los Garza en el área de estudio, se puede observar con la precipitación acumulada anual en la estación 19061 en la figura 3.4. Aquí se observa que la precipitación media acumulada es de 508.23 mm.

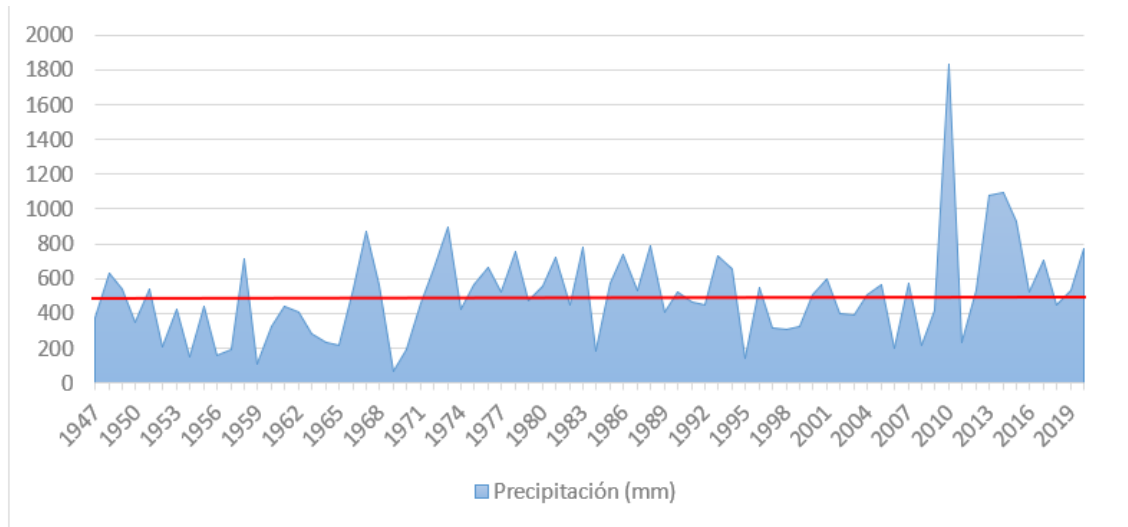


Figura 3.4. Precipitación anual de la estación climatológica 19061 "Topo Chico" (Fuente: Elaboración propia con datos de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2021).

3.3. EVALUACIÓN DE LOS PROTOTIPOS DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS A NIVEL MICRO ESCALA

3.3.1. UBICACIÓN

La ubicación de los prototipos de los techos verdes extensivos debe corresponder a un área en el que se encuentren expuestos directamente a la intemperie, ausente de barreras u obstáculos que interfieran en las mediciones de los parámetros de temperatura y agua, además de la disponibilidad de agua para el riego de la vegetación y facilidad de acceso. Cumpliendo con las condiciones deseadas, los prototipos se ubicaron en la azotea del edificio de posgrado en el Instituto de Ingeniería Civil (IIC) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) (25°44'02.00"N 100°18'21.41"O). En la figura 3.5 se muestra la ubicación por una imagen aérea tomada por un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT).



Figura 3.5. Ubicación de prototipos de techos verdes extensivos en el techo del edificio de posgrado del IIC de la UANL.

En el Instituto de Ingeniería Civil (IIC), se instalaron 4 Prototipos de Techos Verdes Extensivos (PTVE). Estos cuentan con dimensiones de 1.00 x 1.00 x 0.30 metros de largo, ancho y alto, respectivamente, suficientes para poder contener los elementos del techo verde. Estos elementos, fueron colocados de manera que no se interfieran agentes externos que afecten los resultados (personas, animales, sombras). En la figura 3.6 se muestra el área dónde se ubicaron los elementos para la toma de resultados.



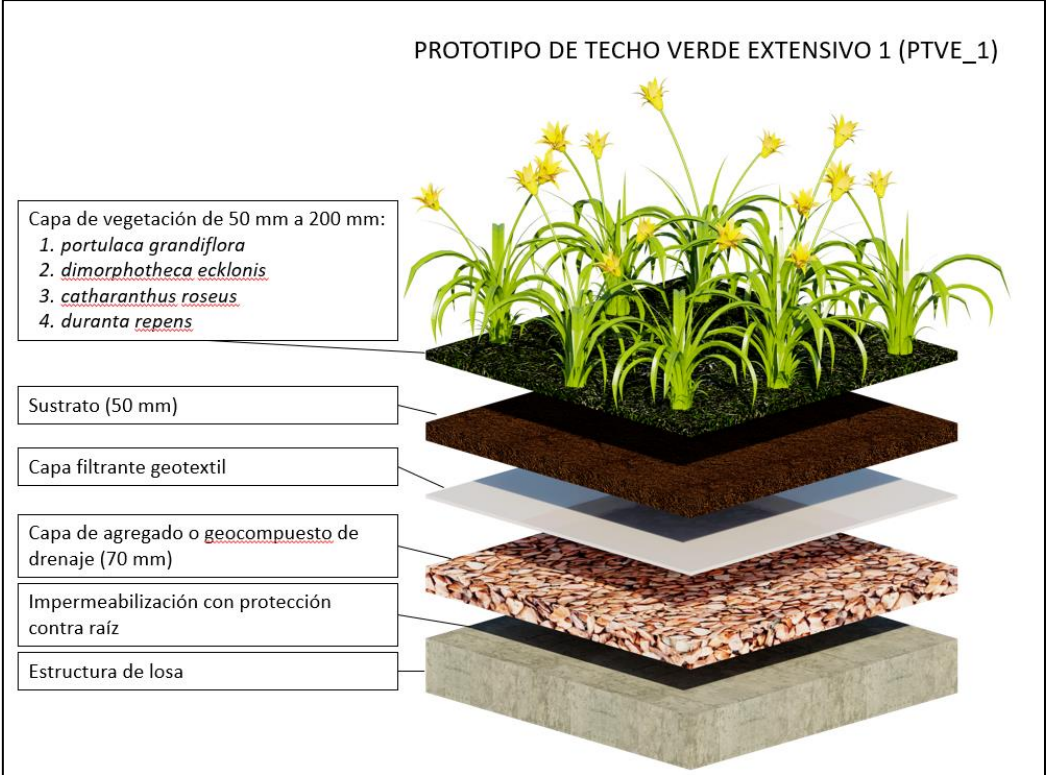
Figura 3.6. Ubicación de los prototipos de techos verdes en la azotea del IIC de la UANL.

3.3.2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS

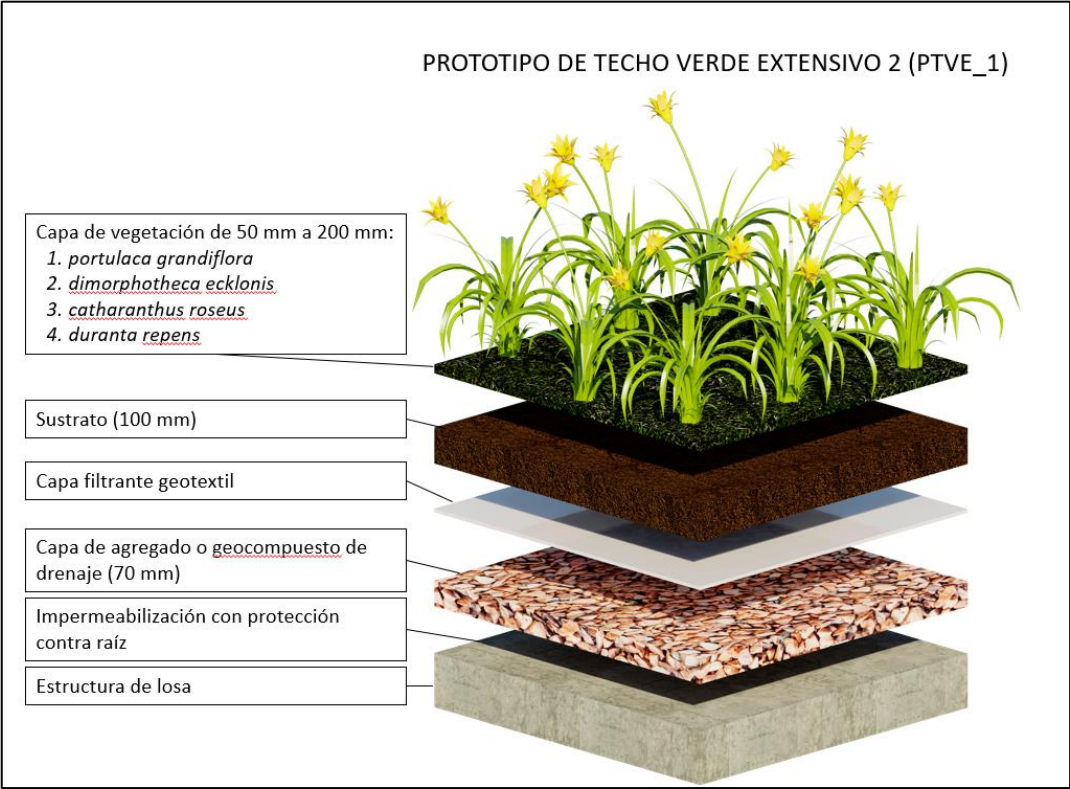
En la presente investigación, se instalaron 4 prototipos de techos verdes extensivos con dimensiones de 1.00 x 1.00 metros, conformados por una capa impermeable, una capa drenante con 7 cm de espesor (roca ígnea porosa), una capa filtrante con malla geotextil, la capa de sustrato y vegetación. Las dimensiones de los prototipos se tomaron con base en las mediciones de precipitación de lluvia, lo cual 1 milímetros de lluvia medido, corresponde a un área de 1 metro cuadrado (Wanielista, Kersten, & Eaglin, 1997).

Se utilizaron diferentes espesores de sustrato con el objetivo de analizar el comportamiento térmico dependiendo de la variación en la profundidad del mismo. Siendo este un parte muy importante, ya que, dependiendo de la profundidad, varía la cantidad de riego, el tiempo en que se mantiene con la humedad requerida (mayor al 80%), el contacto con la superficie y la forma en que se desarrolla la vegetación. Los factores de humedad son una parte relevante para la manera en que se comporta la temperatura dentro del sustrato (Alexandri & Jones, 2008). Con esto fue posible encontrar el de mejor rendimiento para su aplicación en un área con condiciones como las que se encuentran en la presente investigación.

Los prototipos se conformaron de espesores de distinto tamaño. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se observan las capas que conforma el Prototipo de Techo Verde 1 (PTVE1), este tiene un espesor de sustrato de 5.00 cm, el PTVE2 de 10.00, el PTVE3 de 15.00 cm y el PTVE4 de 10.00. El P4, a diferencia de los demás prototipos, no tendrá vegetación, con el objetivo de ser un prototipo de control con una altura de espesor media.



A)



B)

Figura 3.7. Prototipos de techos verdes PTVE1 (A), PTVE2 (B), PTVE3 (C) y PTVE4 (D).

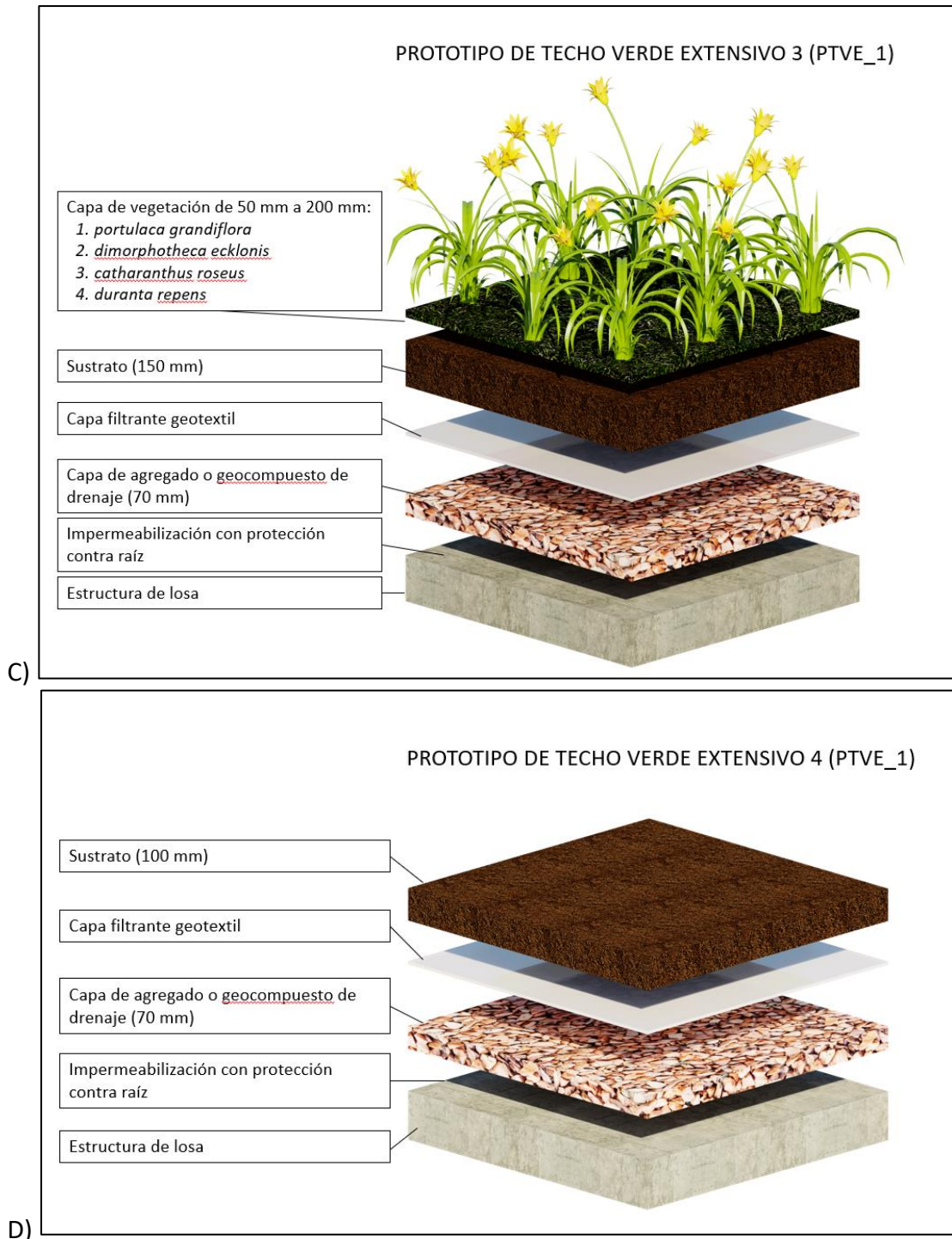


Figura 3.7 (continuación). Prototipos de techos verdes PTVE1 (A), PTVE2 (B), PTVE3 (C) y PTVE4 (D).

La primera capa que conforman los prototipos de los techos verdes, es la capa impermeable, esto con el fin de evitar filtraciones del agua hacia la superficie de la losa. En este caso, al ser un prototipo, se aplicó un sellador impermeable blanco fibratado de

marca Thermo-tek 19 con duración de 5 años. De esta manera, el agua que pase a través de cada capa del techo verde, puede ser captada y no se filtrará por su estructura. Esta capa se muestra por la figura 3.8.



Figura 3.8. Capa impermeable. Aplicación de sellador impermeable blanco fibratado de marca Thermo-tek 19 con duración de 5 años.

En la capa drenante, se utilizó roca volcánica de jardinería, ya que tiene una buena conductividad hidráulica y, sobre ella se utilizará una malla geotextil para evitar las filtraciones del sustrato hacia la capa drenante, en la figura 3.9, se observan estos 2 componentes.



Figura 3.9. Capa drenante (roca volcánica de jardinería) y capa filtrante (malla geotextil).

Dentro de las capas de un techo verde, el tipo de sustrato que se utilizó fue tomado en cuenta de acuerdo a la estructura de Vijayaraghavan & Raja (2014), un sustrato conformado de 25%, 25%, 30%, y 20% de vermiculita, tierra con material orgánico, perlita y ladrillos triturados, respectivamente desempeña características deseadas en un techo verde, como lo es una baja densidad aparente (431 kg / m³), alta capacidad de retención de agua (39.4%), porosidad llena de aire (19.5%) y conductividad hidráulica (4570 mm / h). En la figura 3.10 se observa esta composición y la manera en la que quedó mezclada al ser instalada.



Figura 3.10. Composición del sustrato para los prototipos de techos verdes.

La capa que conforma la superficie del prototipo del techo verde y una parte indispensable, es la capa de vegetación. La selección de la vegetación es una parte indispensable porque, de acuerdo con Alvarado, Rocha, & Moreno (2010), las especies que son nativas, son altamente recomendables por sus ventajas ecológicas, su fácil propagación, resistencia a plagas, poco requerimiento de agua, bajo costo en mantenimiento, portes que van de acuerdo a la ciudad, por encontrarse en su entorno de origen. Es por esto, que se seleccionaron 4 tipos de vegetación para su implementación en los prototipos de techos verdes, las cuales son las plantas *portulaca grandiflora*, *dimorphothea ecklonis*, *catharanthus roseus* y *duranta repens*.

El fin de la colocación de estas plantas es meramente por un sentido ornamental, buscando que su función también sea estética, respetando, conservando y fomentando un contacto directo del hombre con la naturaleza, aun encontrándose en una zona urbana. En la figura 3.11, se muestran las correspondientes plantas.



Figura 3.11. Capa de vegetación utilizada en los prototipos de techos verdes (*portulaca grandiflora*, *dimorphotheca ecklonis*, *catharanthus roseus* y *duranta repens*).

Para mantener la vegetación activa se realizó la irrigación de las mismas, manteniendo una humedad del sustrato de 85% hasta el 100% para mantener mejores resultados térmicos (Chagolla-Aranda et al., 2017), de esta manera también es posible aumentar los efectos de disminución de temperatura en la superficie. La irrigación se realizó 3 veces a la semana en un horario entre las 17:00 a las 19:00 horas, los lunes, miércoles y viernes. Asimismo, para mantener esta humedad, se añadían 12 litros de agua en los meses de invierno y 20 litros de agua en verano.

3.3.3. TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Las mediciones de los parámetros de temperatura y humedad relativa de los prototipos de los techos verdes extensivos, se tomaron con Elitech RC-51H PDF USB Temperature and Humidity Data Logger Reusable Recorder. El aparato cuenta con un sensor de temperatura en la parte inferior, para detectar los parámetros necesarios, asimismo, la información se recopiló por la entrada USB que cuenta, pero se tiene protegida y hermética por una tapa de plástico, evitando que entre humedad y polvo en la entrada. En la figura 3.12, se aprecia una fotografía del sensor utilizado para la recopilación de datos.



Figura 3.12. Equipo Elitech RC-51H PDF USB Temperature and Humidity Data Logger Reusable Recorder.

Este equipo tiene la capacidad de recolectar la información por su memoria incluida, de la cual, cada mes se descargaban los datos. De ahí, se proporcionaba la información de temperatura y humedad relativa a intervalos a cada 15 minutos. Los parámetros técnicos se encuentran en la tabla 3.2, que incluyen el rango de temperatura, de humedad relativa, la resolución, precisión del equipo, el tipo de sensor, capacidad de registro, intervalo de registro, el tipo de pantalla, modo de operación, tipo de comunicación, sistema operativo, las dimensiones y la capacidad de resistencia al agua.

Tabla 3.2. Parámetros técnicos del Elitech RC-51H PDF USB Temperature and Humidity Data Logger Reusable Recorder.

Parámetros técnicos	
Rango de temperatura	- 30 °C a 70 °C'
Rango de humedad	10% a 95%
Resolución	0.1 °C , 0.1% HR
Precisión de temperatura	±0.5°C/0.9°F(-20°C~-40°C), ±1°C/1.8°F (otros)
Precisión de humedad	±3% HR (25°C, 20%~90% HR), ±5% HR (otros)
Sensor:	Sensor de temperatura y humedad incorporado
Capacidad de registro	32000 puntos (máx.), Ciclo de datos de soporte y cobertura
Intervalo de registro	10 segundos a 12 horas (personalizable)
Tipo de pantalla	LCD multifunción, indicador de estado
Modo de operación	Teclado multifunción
Tipo de comunicación	USB 2.0
Sistema operativo	WIN / MAC (no admite la operación de la computadora superior, sino solo la vista de informes AI en el sistema MAC)
Nivel a prueba de agua	IP65
Dimensión	131 mm * 24 mm

Los sensores de temperatura fueron colocados en el fondo del sustrato de cada prototipo, quedando a una profundidad de 5.00, 10.00, 15.00 y 10.00 del PTVE1, PTVE2, PTVE3 Y PTVE4, respectivamente. Asimismo, se colocó un sensor de manera superficial del PTVE2, y otro sensor expuesto directamente en el techo convencional donde se encuentran los PTVE, para obtener la información necesaria para el análisis. En la tabla 3.3, se muestra la ubicación de los sensores de temperatura, así como la profundidad en la que se encuentran instalados en cada PTVE y si se cuenta con vegetación o no.

Tabla 3.3. Ubicación de los sensores de temperatura.

SENSORES	PROTOTIPO	PROFUNDIDAD SUSTRATO (CM)	VEGETACIÓN
SENSOR 1	PTVE 1	0	Si
SENSOR 2	PTVE 1	5	Si
SENSOR 3	PTVE 2	10	Si
SENSOR 4	PTVE 3	15	Si
SENSOR 5	PTVE 4	10	No
SENSOR 6	Techo convencional	0	No

En la figura 3.13 se puede observar la ubicación de los sensores de temperatura por medio de una ilustración gráfica, así como en la figura 3.14, se observa su ubicación por una imagen tomada en el lugar donde se encuentran ubicados.

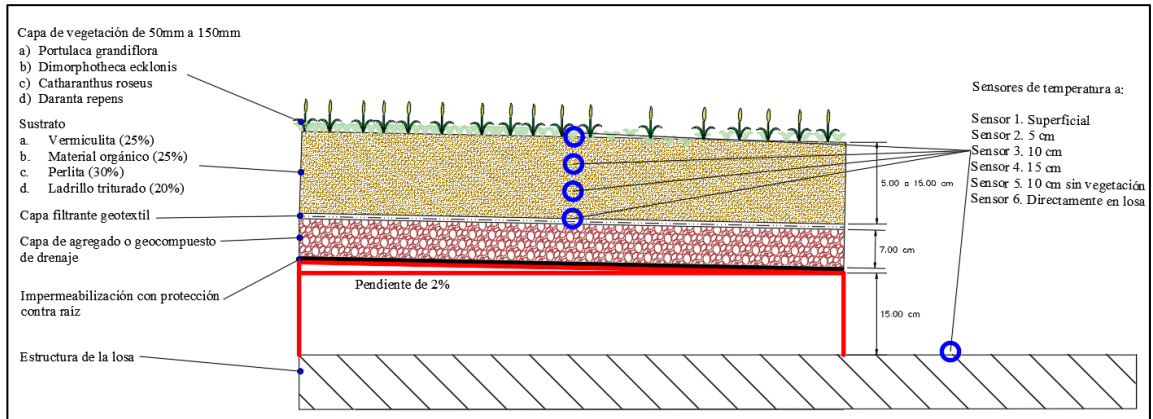


Figura 3.13. Medición de los parámetros de temperatura en el prototipo de techo verde.

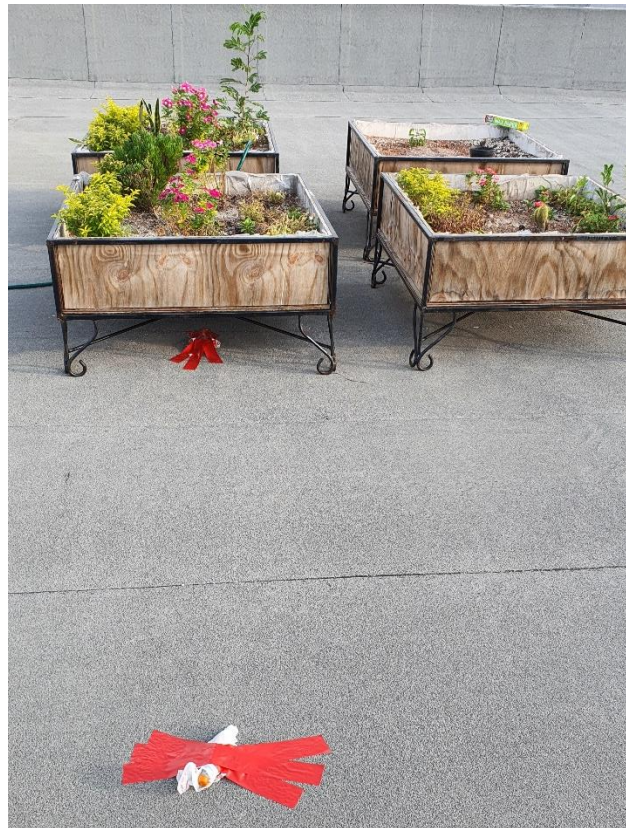


Figura 3.14. Ubicación de los sensores de temperatura en el prototipo de techo verde.

Se dio inicio con la recopilación de información el día lunes 6 de abril del 2020 hasta el día lunes 31 de marzo del 2021. La información se tomó a las 18:00 horas, donde se obtuvieron datos de temperatura a intervalo de 15 minutos. Cabe mencionar, que se descartaron los datos del mes de julio de 2020 y del mes de septiembre de 2020, debido a problemas externos con el equipo de medición, por lo tanto, se excluyeron los datos correspondientes.

Esta información se encuentra en un formato PDF y se almacena en una hoja de Excel para un mejor manejo de los datos. Cabe mencionar, que el sustrato se mantiene con una humedad relativa mínima de 80%, para un buen desempeño del medio vegetativo y de temperatura.

3.3.4. TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS

La recopilación de datos de temperatura en las profundidades correspondientes a cada PTVE, por medio de los sensores de temperatura, fueron extraídos directamente del equipo en un formato PDF. De esta manera fue posible analizar cada información mensual y observar su comportamiento a cada 15 minutos. Esta información fue tratada y convertida a archivos de txt, para posteriormente procesarlos por el programa de Microsoft Excel.

Inicialmente la información de los sensores de temperatura fue vaciada en Microsoft Excel, que al utilizar la función de “tabla dinámica” se organizó la información de temperaturas máximas, mínimas y promedio que se presentaron a cada 15 minutos dentro de las 24 horas del día de cada mes en estudio. Organizada la información, fue posible utilizarla para realizar una representación gráfica, de esta manera, se observa el comportamiento térmico de cada sensor instalado en los PTVE por cada mes presentado. De esta forma, el comportamiento térmico mensual, se puede ver más fácilmente cómo la profundidad del sustrato actúa en la temperatura, y qué relación ventajas existen en comparación con el sensor que se encuentra directamente en el techo convencional.

De aquí, se determinó que los sensores más críticos fueron el “Sensor 4” y el “Sensor 6”, que es el del Prototipo de Techo Verde Extensivo 4 (a una profundidad de 15

centímetros) y el que se encuentra directamente en el techo, respectivamente. El sensor 4 fue el que mostró mejor desempeño térmico que los demás. Con los datos de ambos termómetros, se graficaron los resultados e interpretaron por medio de tablas, para tener una mejor visualización de la información.

Asimismo, se hizo un análisis de la varianza por el método ANOVA con un nivel de significancia de 0.05, indicando que existe un riesgo de 5% de concluir que existe una diferencia. Se plantea que la hipótesis nula establece que las medias de temperatura de los Prototipos de Techos Verdes Extensivos y el Techo Convencional son iguales, mientras que la hipótesis alternativa establece que son diferentes. Gracias a este análisis, fue posible determinar la relación de la varianza que existe entre ambos sensores de temperatura, obteniendo conclusiones de la relación que existe en el comportamiento térmico de ambos tipos de techo.

3.4. EVALUACIÓN DE LOS PROTOTIPOS DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS A NIVEL MACRO ESCALA

3.4.1. UBICACIÓN

Para la evaluación a nivel macro escala del rendimiento térmico por el programa ENVI-MET, se tomó en cuenta una zona cercana a la estación climatológica 19061 “Topo Chico”, la cual se encuentra a una distancia de 1.14 km del área en cuestión. El área de estudio, se encuentra ubicado en el municipio de San Nicolás de los Garza en el estado de Nuevo León, México. El área modelada abarca 42,286.13 m², con la ubicación de los marcos de 25°44’35.40” N 100°18’23.56” O y 25°44’28.78” N 100°18’16.18” O. La localización se puede visualizar por una imagen satelital en la figura 3.15.



Figura 3.15. Área de análisis a nivel macro escala.

3.4.2. TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La modelación por medio del programa ENVI-met cuenta con la opción de realizar los cálculos correspondientes con datos climatológicos mismos del programa, pero también puede interpretar la información con datos medidos, directamente del sitio. Por este motivo, la presente investigación se aplicaron datos medidos de la estación climatológica 19061 “Topo Chico”. Esta cuenta con instrumentos de medición de temperatura máxima absoluta, máxima media, media: mínima media, mínima absoluta; humedad: relativa, absoluta, relación de mezcla, específica, presión del vapor; viento: dirección y velocidad, ráfaga máxima; nubosidad: tipo, altura, cantidad; presión: máxima absoluta, máxima media, media, mínima media, mínima absoluta; precipitación: cantidad, frecuencia, intensidad; radiación.

De la información que fue utilizada para el programa se aplicaron los datos de la fecha, hora (a cada 30 minutos), radiación solar (W/m^2), temperatura ambiental ($^{\circ}C$), humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s), dirección del viento (grados) y precipitación (mm) de la estación en cuestión. Se utilizaron los datos de las fechas que se presentó mayor y menor temperatura de los años del 2016 al 2020, siendo el 08 de junio de 2019 y el 17 de enero de 2018, respectivamente.

La siguiente sección especificada fue de las características de los techos convencionales en los edificios, que se especificó con un espesor promedio en las viviendas que es de 20 centímetros, con material de concreto. Estas características fueron aplicadas a todos los edificios que se modelen en el programa. En la figura 3.17, se observan los datos aplicados.

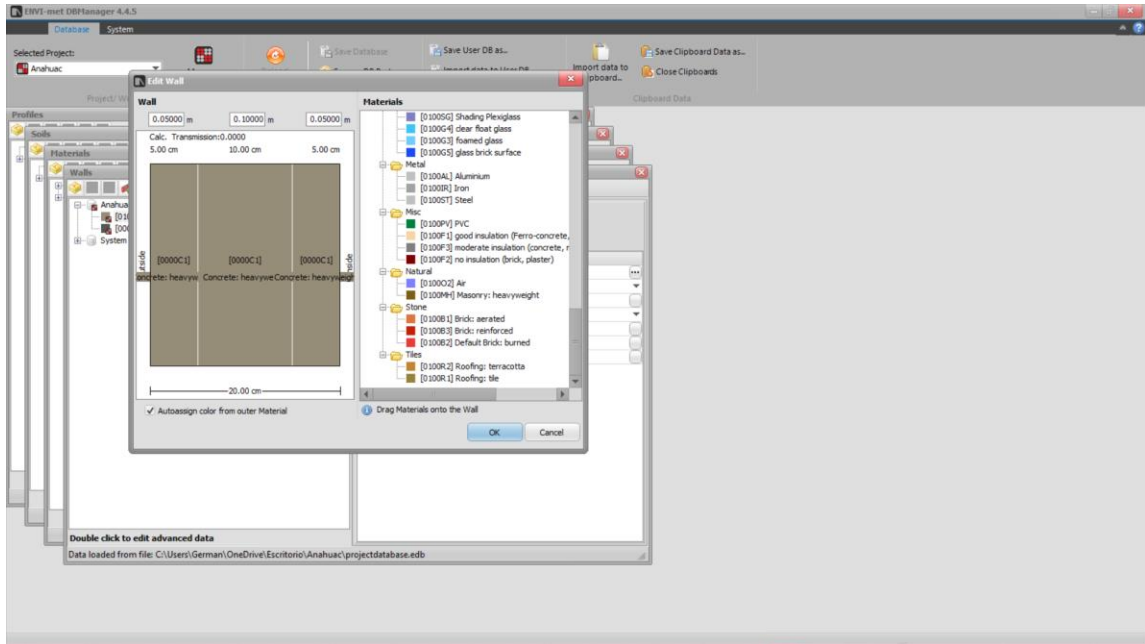


Figura 3.17. Configuración de propiedades de los muros en el Database Manager en ENVI-MET.

Las últimas características aplicadas en los materiales de los edificios fueron los muros que lo conforman. Es común que en la construcción de casa habitación se utilicen blocks de concreto para los muros, con un ancho de 15 centímetros, asimismo, se tiene un recubrimiento de zarpeo y afine de cemento con un ancho de 2 centímetros, así como en el interior de la casa habitación de yeso. Estas características fueron aplicadas y se observan en la figura 3.18.

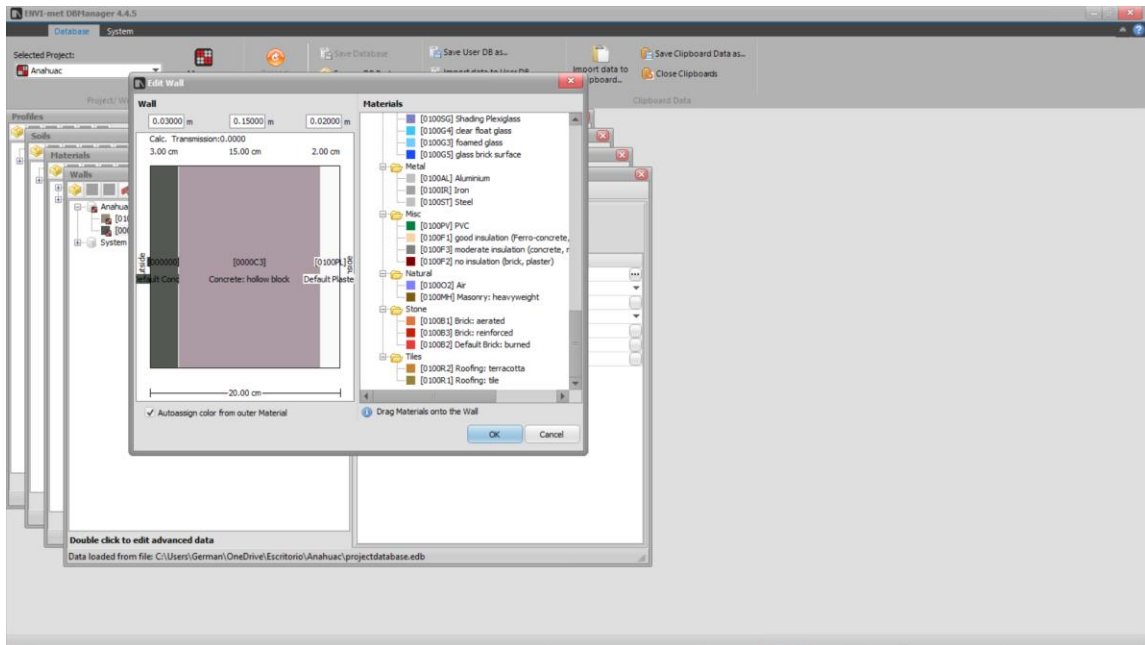


Figura 3.18. Configuración de propiedades de los techos convencionales en el Database Manager en ENVI-MET.

MONDE

La sección de MONDE permite digitalizar el área de estudio. Inicialmente se muestra el área de trabajo en blanco, donde antes de comenzar a trabajar, se especifica la ubicación del área de estudio y éste debe de ser georreferenciado. En este caso se buscó el área de estudio directamente el área de estudio en el programa, especificando que se encuentra en la colonia Anáhuac, del municipio de San Nicolás de los Garza, Nuevo León. Se menciona en el programa que la proyección es Transverse Mercator, proyectado al sistema de coordenadas WGS 1984 UTM zona 14 Norte. De esta forma el programa lo ubica, como se muestra en la figura 3.19.

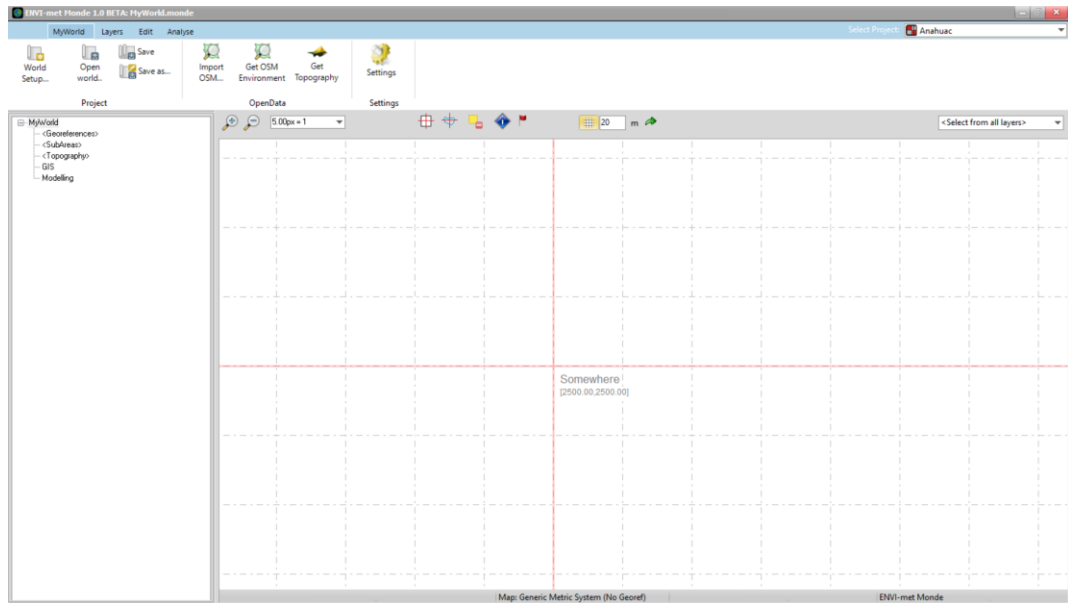


Figura 3.19. Área de trabajo de la sección MONDE.

Una vez que MONDE reconoce el área de estudio y se encuentra delimitado por un área, es posible importar modelos vectoriales de la zona. El programa cuenta con la opción de acceder a la base de datos mundial de OpenStreetMap y OpenTopography para generar modelos en ENVI-met. En este caso, se importaron los modelos por medio de archivos Shape georreferenciados (ver figura 3.20). También, es necesario señalar al programa los atributos de cada uno de los elementos, siendo la altura de los edificios, el atributo fundamental para esta modelación.

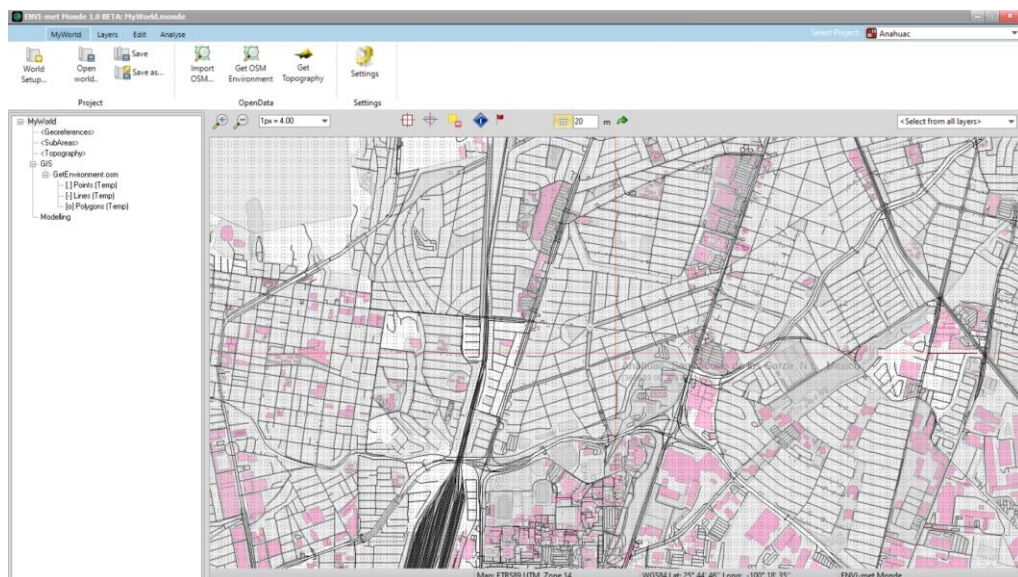


Figura 3.20. Importación de archivos Shape de las manzanas en el área de estudio.

SPACES

La sección de Spaces permite digitalizar el modelo basado en el ráster creado previamente en Monde. Por consiguiente, el siguiente paso consistió en digitalizar la información shape que se utilizó en el paso anterior. Para esto, se debe seleccionar la misma zona de estudio por medio de la configuración del programa, verificando que se encuentre en las mismas proyecciones y con la información correspondiente. El área de trabajo se muestra por la figura 3.21.

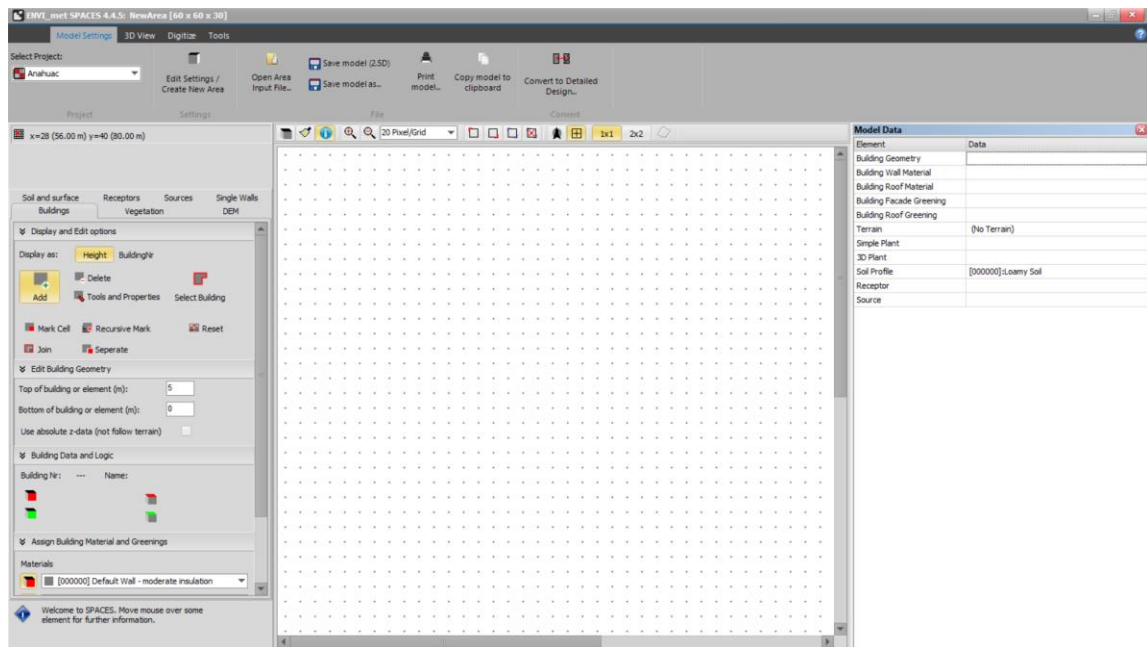


Figura 3.21. Área de trabajo de la sección SPACES.

Para verificar que la ubicación corresponda a lo realizado en Monde, se colocó un mapa base del área de estudio para verificar que la información esté ubicada correctamente, como se muestra en la figura 3.22. Para esta función, fue indispensable verificar que los parámetros de los materiales establecidos por la sección de Database Manager se ubicaran en la sección de Spaces, ya que, en esta parte, es dónde se aplicaron los materiales correspondientes a cada uno de los edificios.

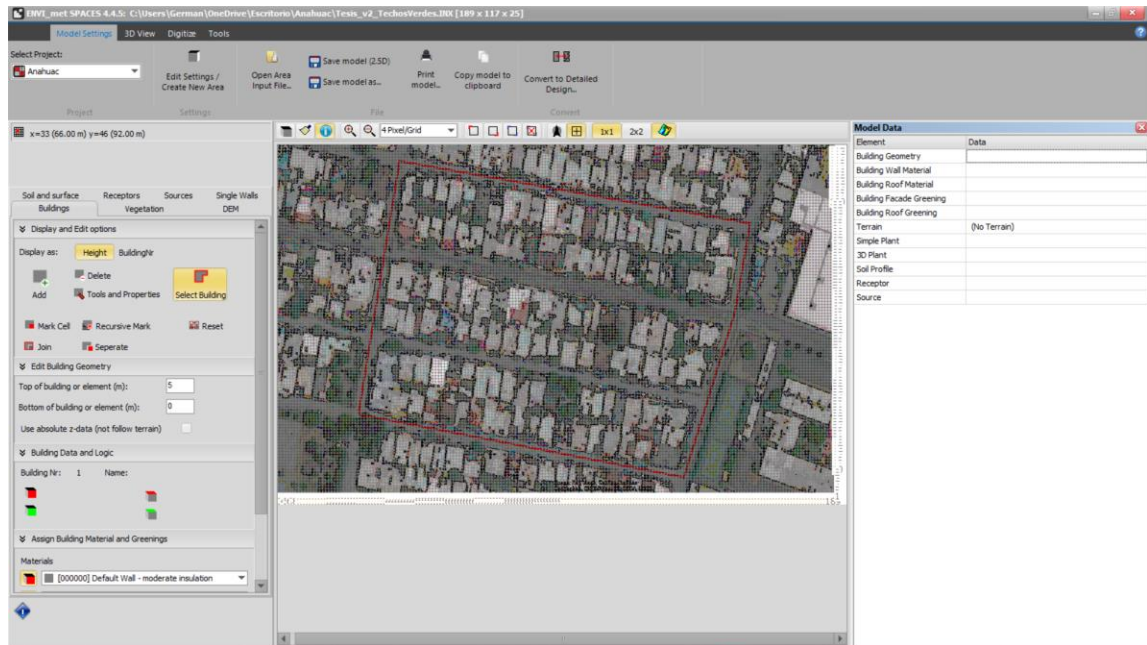


Figura 3.22. Importación de imagen con formato BMP para ser utilizado de basemap en la sección de SPACES.

Una vez que se haya verificado que la información de Monde corresponda con la de Spaces, ahora si es posible ligar los atributos de alturas de los edificios (tienen un rango de altura entre 5 a 12 metros), para que el programa lo reconozca construya la información automáticamente. Después se eliminaron los que no correspondían al área que se modelará. También, es necesario, que mediante las funciones del programa, se establezca que se utilizará pavimento en las calles, así como poner la vegetación que existe. Aquí se aplicaron árboles de alturas aproximadas a 10 metros. Teniendo como resultado lo que se muestra en la figura 3.23.

Aquí se guardaron 2 modelos de Spaces, el primero consistió en lo representado por la figura 3.23, pero en condiciones normales, utilizando materiales convencionales para los techos de las casas, que es el concreto. En el caso de la segunda condición del modelo, fue aplicando en el área de estudio una propuesta del 50% de techos verdes en las casas. Esto para poder tener los 2 tipos de modelos y obtener resultados con la implementación de techos verdes en el área de estudio.

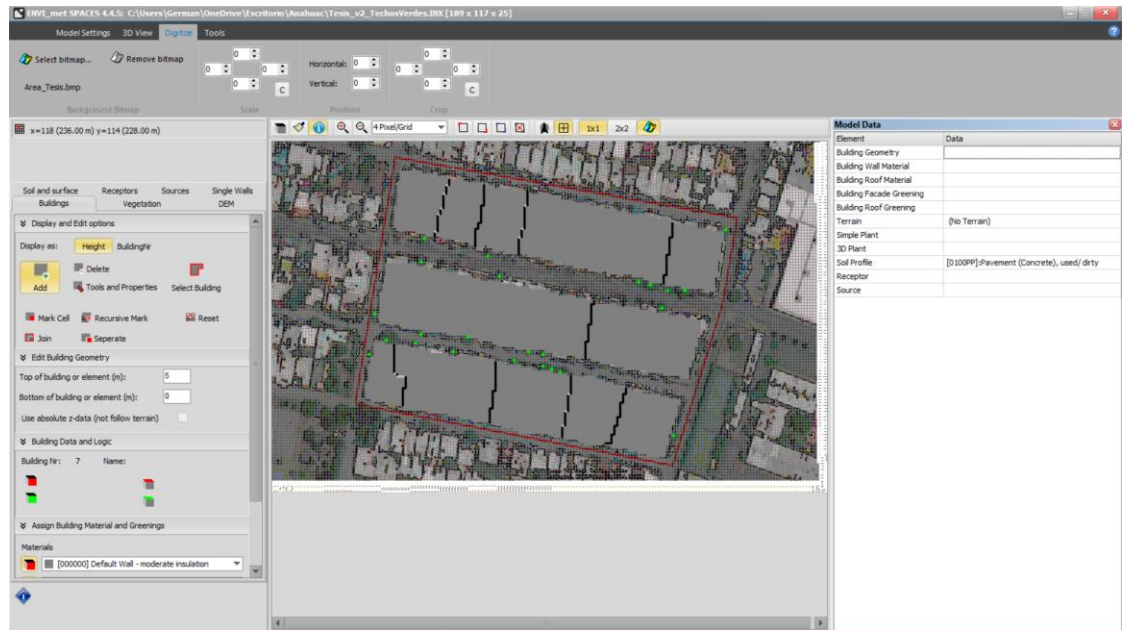


Figura 3.23. Generación de edificios en la sección SPACES del área de estudio.

La información aplicada puede verse reflejada en un modelo 3D, donde es posible ver la altura de los edificios, los árboles seleccionados, así también como las dos condiciones propuestas (una con techos convencionales y otra con el 50% de techos verdes). En la figura 3.24, se observa el modelo en 3D, con la altura de los edificios, los árboles del área de estudio y el 50% de los edificios con techos verdes.

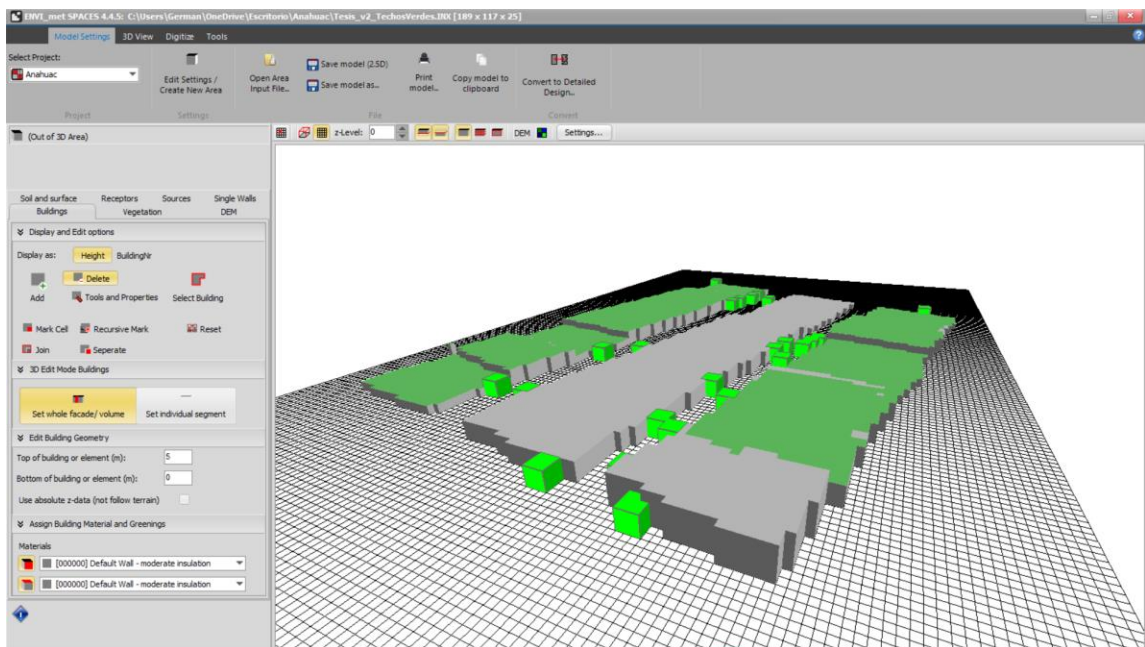


Figura 3.24. Vista 3D del modelo con techos verdes en un 50% en la sección SPACES.

DATOS

Para la generación del modelo, aplicando lo generado por las secciones de Database Manager, Monde y Spaces, se tiene la opción de usar los datos que el programa proporciona, pero para este caso, se cuenta con información recopilada de la estación climatológica 19061 “Topo Chico”. El programa requiere la información de las fechas, la hora a cada 30 minutos, la radiación solar de onda corta y larga (W/m^2), temperatura ambiente ($^{\circ}C$), humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s), dirección del viento (grados) y precipitación (mm). Esta información se aplicó para las fechas de mayor y menor temperatura presentados del año 2016 al 2020, siendo la primera en la fecha de 08 de junio de 2019 y la segunda en la fecha de 17 de enero de 2019. Estos datos se encuentran en la tabla 3.4 y tabla 3.5.

Tabla 3.4. Datos utilizados para el modelo ENVI-GUIDE, en la fecha 08 de junio de 2019.

DATE	TIME	SW DOWN	SW Dif	LW down	TA	RH	Wind Speed	Wind Dir	Precipitation
08.06.2019	00:00:00	0	0	0	304.45	48	1.44	90	0
08.06.2019	00:30:00	0	0	0	303.85	49.5	1	90	0
08.06.2019	01:00:00	0	0	0	303.15	51	0.92	90	0
08.06.2019	01:30:00	0	0	0	302.85	52.5	1.81	90	0
08.06.2019	02:00:00	0	0	0	302.35	54	1.19	90	0
08.06.2019	02:30:00	0	0	0	302.05	56	0.69	90	0
08.06.2019	03:00:00	0	0	0	301.65	58	1.67	90	0
08.06.2019	03:30:00	0	0	0	301.65	59.5	1.14	90	0
08.06.2019	04:00:00	0	0	0	301.05	61	0.14	90	0
08.06.2019	04:30:00	0	0	0	300.85	60.5	1.22	90	0
08.06.2019	05:00:00	0	0	0	301.05	60	0.75	90	0
08.06.2019	05:30:00	0.5	0	0	300.95	59.5	0.89	90	0
08.06.2019	06:00:00	1	0	0	300.95	59	1.22	90	0
08.06.2019	06:30:00	14	0	0	300.85	59	0.28	90	0
08.06.2019	07:00:00	27	0	0	301.35	59	1.94	90	0
08.06.2019	07:30:00	103.5	0	0	302.25	56	1.28	90	0
08.06.2019	08:00:00	180	0	0	303.35	53	1.42	90	0
08.06.2019	08:30:00	290	0	0	305.05	50	0.42	90	0
08.06.2019	09:00:00	400	0	0	305.75	47	0.75	90	0
08.06.2019	09:30:00	427	0	0	307.15	44.5	0.75	90	0
08.06.2019	10:00:00	454	0	0	308.05	42	0.14	90	0
08.06.2019	10:30:00	520.5	0	0	308.85	38	0.61	90	0
08.06.2019	11:00:00	587	0	0	310.35	34	2.28	90	0
08.06.2019	11:30:00	753	0	0	310.65	33	1.25	90	0
08.06.2019	12:00:00	919	0	0	311.65	32	2.39	90	0
08.06.2019	12:30:00	933	0	0	312.55	22.5	0.14	90	0

Tabla 3.4 (continuación). Datos utilizados para el modelo ENVI-GUIDE, en la fecha 08 de junio de 2019.

DATE	TIME	SW DOWN	SW Dif	LW down	TA	RH	Wind Speed	Wind Dir	Precipitation
08.06.2019	13:00:00	947	0	0	314.15	13	2.42	90	0
08.06.2019	13:30:00	962	0	0	314.55	13	2.53	90	0
08.06.2019	14:00:00	977	0	0	314.95	13	0.42	90	0
08.06.2019	14:30:00	940.5	0	0	315.65	11.5	2.42	90	0
08.06.2019	15:00:00	904	0	0	315.75	10	1.92	90	0
08.06.2019	15:30:00	828.5	0	0	315.95	10	1.25	90	0
08.06.2019	16:00:00	753	0	0	315.95	10	4.64	90	0
08.06.2019	16:30:00	655.5	0	0	316.35	9.5	3.83	90	0
08.06.2019	17:00:00	558	0	0	315.75	9	1.36	90	0
08.06.2019	17:30:00	456.5	0	0	315.45	9	3.33	90	0
08.06.2019	18:00:00	355	0	0	314.95	9	2.03	90	0
08.06.2019	18:30:00	252	0	0	314.15	10	5.06	90	0
08.06.2019	19:00:00	149	0	0	313.15	11	1.97	90	0
08.06.2019	19:30:00	79	0	0	311.65	13	4.17	90	0
08.06.2019	20:00:00	9	0	0	310.75	15	0.83	90	0
08.06.2019	20:30:00	4.5	0	0	309.95	23	1.19	90	0
08.06.2019	21:00:00	0	0	0	308.45	31	1.42	90	0
08.06.2019	21:30:00	0	0	0	307.35	39	3.14	90	0
08.06.2019	22:00:00	0	0	0	306.55	47	1.83	90	0
08.06.2019	22:30:00	0	0	0	305.15	52	4.28	90	0
08.06.2019	23:00:00	0	0	0	304.55	57	0.75	90	0
08.06.2019	23:30:00	0	0	0	304.05	57	1.03	90	0

Tabla 3.5. Datos utilizados para el modelo ENVI-GUIDE, en la fecha 17 de enero de 2018.

DATE	TIME	SW DOWN	SW Dif	LW down	TA	RH	Wind Speed	Wind Dir	Precipitation
17.01.2018	00:00:00	13	0	0	271.75	67	1.14	90	0
17.01.2018	00:30:00	9.5	0	0	271.55	70	0.83	90	0
17.01.2018	01:00:00	6	0	0	271.45	73	0.36	90	0
17.01.2018	01:30:00	3	0	0	271.55	77	1	90	0
17.01.2018	02:00:00	0	0	0	271.35	81	0.47	90	0
17.01.2018	02:30:00	0	0	0	271.35	83	0.39	90	0
17.01.2018	03:00:00	0	0	0	271.35	85	1	90	0
17.01.2018	03:30:00	0	0	0	271.45	85.5	1.69	90	0
17.01.2018	04:00:00	0	0	0	271.55	86	0.44	90	0
17.01.2018	04:30:00	0	0	0	271.45	86.5	0.89	90	0
17.01.2018	05:00:00	0	0	0	271.15	87	0.64	90	0
17.01.2018	05:30:00	0	0	0	271.15	86.5	0.14	90	0
17.01.2018	06:00:00	0	0	0	271.25	86	1.86	90	0
17.01.2018	06:30:00	0	0	0	271.25	85	1.39	90	0
17.01.2018	07:00:00	0	0	0	271.05	84	0.58	90	0
17.01.2018	07:30:00	0	0	0	270.95	84	1.75	90	0
17.01.2018	08:00:00	0	0	0	271.05	84	0.97	90	0
17.01.2018	08:30:00	2	0	0	271.55	72.5	1.22	90	0

Tabla 3.5 (continuación). Datos utilizados para el modelo ENVI-GUIDE, en la fecha 17 de enero de 2018-

DATE	TIME	SW DOWN	SW Dif	LW down	TA	RH	Wind Speed	Wind Dir	Precipitation
17.01.2018	09:00:00	4	0	0	271.25	61	1.11	90	0
17.01.2018	09:30:00	32	0	0	271.75	56	0.81	90	0
17.01.2018	10:00:00	60	0	0	271.95	51	1.06	90	0
17.01.2018	10:30:00	68	0	0	272.25	33	1.81	90	0
17.01.2018	11:00:00	76	0	0	272.35	15	0.69	90	0
17.01.2018	11:30:00	88.5	0	0	272.45	13.5	0.83	90	0.4
17.01.2018	12:00:00	101	0	0	272.85	12	1.25	90	0
17.01.2018	12:30:00	129.5	0	0	273.15	12	2.31	90	0
17.01.2018	13:00:00	158	0	0	273.45	12	2.42	90	0
17.01.2018	13:30:00	222.5	0	0	274.15	11	2.19	90	0
17.01.2018	14:00:00	287	0	0	274.95	10	1.5	90	0
17.01.2018	14:30:00	313	0	0	275.55	8.5	1.56	90	0
17.01.2018	15:00:00	339	0	0	275.55	7	0.64	90	0
17.01.2018	15:30:00	262.5	0	0	276.05	7.5	1.58	90	0
17.01.2018	16:00:00	186	0	0	275.65	8	0.86	90	0
17.01.2018	16:30:00	111	0	0	275.05	8	1.86	90	0
17.01.2018	17:00:00	36	0	0	274.95	8	2.81	90	0
17.01.2018	17:30:00	18.5	0	0	274.65	8.5	1.14	90	0
17.01.2018	18:00:00	1	0	0	274.25	9	1.75	90	0
17.01.2018	18:30:00	0.5	0	0	273.95	12	0.94	90	0
17.01.2018	19:00:00	0	0	0	273.75	15	0.67	90	0
17.01.2018	19:30:00	0	0	0	273.65	16.5	0.89	90	0
17.01.2018	20:00:00	0	0	0	273.35	18	3.39	90	0
17.01.2018	20:30:00	0	0	0	273.85	24	1.03	90	0
17.01.2018	21:00:00	0	0	0	274.05	30	2.56	90	0
17.01.2018	21:30:00	0	0	0	273.85	29	1.22	90	0
17.01.2018	22:00:00	0	0	0	273.55	28	0.83	90	0
17.01.2018	22:30:00	0	0	0	273.35	36	0.94	90	0
17.01.2018	23:00:00	0	0	0	273.55	44	0.25	90	0
17.01.2018	23:30:00	0	0	0	273.75	47.5	0.61	90	0

ENVI-GUIDE

El paso final para la generación del modelo es en la sección de ENVI-GUIDE. Esta sección te permite crear un modelo de lo generado por las secciones anteriores, aplicando lo del Database Manager, MONDE, SPACES y los datos que se mencionaron en el presente apartado.

Aquí se encuentra la opción de utilizar los datos climatológicos que el programa genera de cada ciudad dependiendo del área de análisis, en este caso se aplicaron los

datos recopilados y ordenados en la sección anterior. En este último paso, se verifica que todos los datos y archivos se coloquen correctamente y al final de este, se generaron archivos que son visualizados por la sección llamada LEONARDO, el cual nos generó imágenes de visualización del modelo. En la figura 3.25, se muestra la primera parte que es seleccionar el modelo generado por Spaces, los cuales fueron 2 escenarios, el primero es el área de estudio con 50% de techos verdes, el segundo es el área de estudio con techos convencionales.

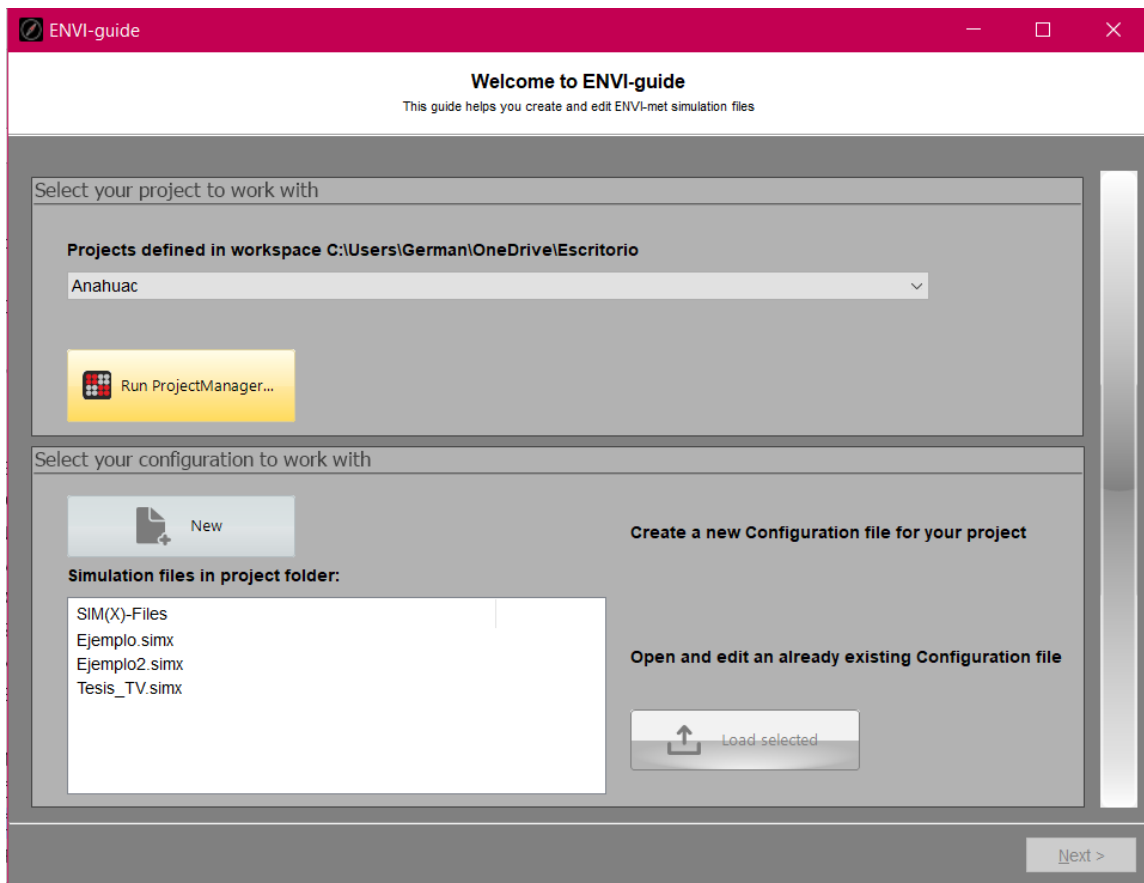


Figura 3.25. Interfaz de la sección ENVI-GUIDE.

Posteriormente, se seleccionaron las fechas en las que se realizó la modelación, que en este caso se seleccionaron las fechas el 08/06/2019 para el caso de verano y el 17/01/2018 para el caso de invierno, en un análisis de 24 horas, así como se muestra en la figura 3.26.

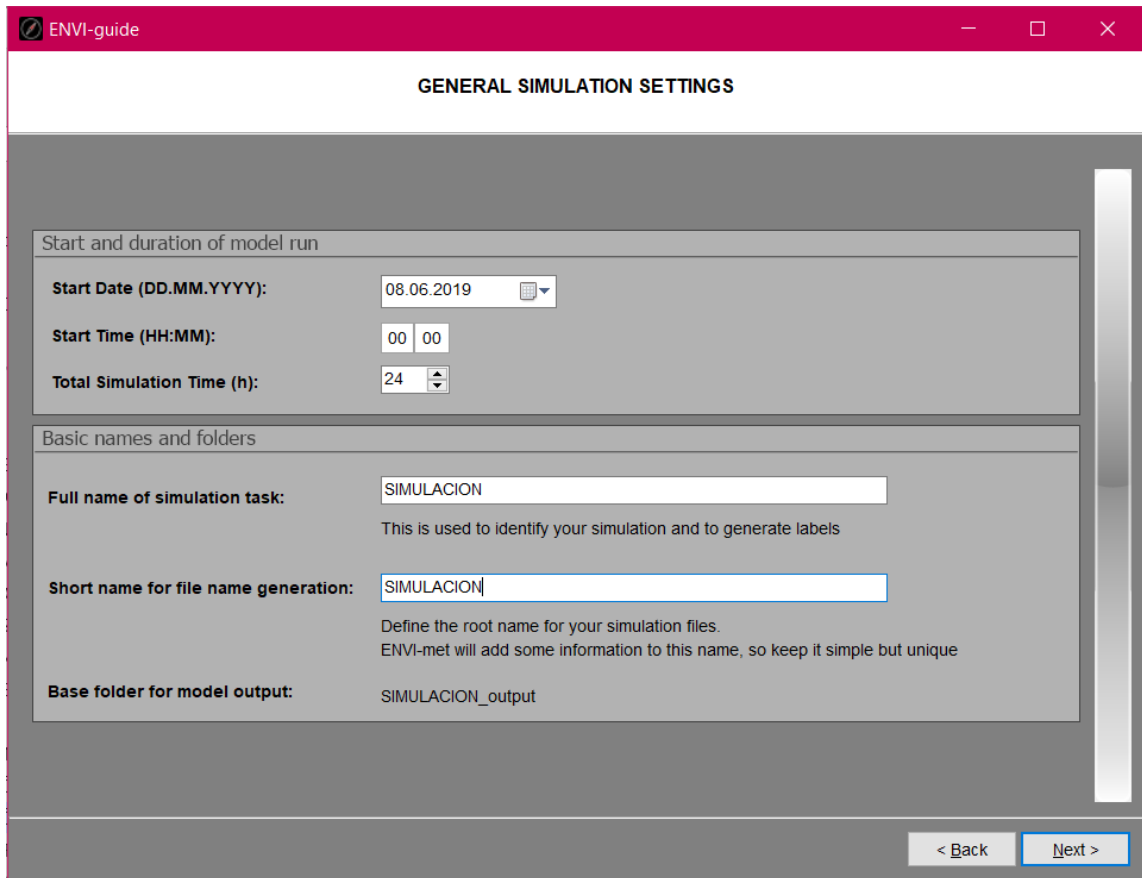


Figura 3.26. Datos para la simulación.

Ahora bien, vemos en la figura 3.27, que es necesario seleccionar la fuente de datos para que el programa realice la modelación correspondiente. Aquí se utilizaron los datos de la estación climatológica 19061, insertando un archivo de Excel de tipo CSV.

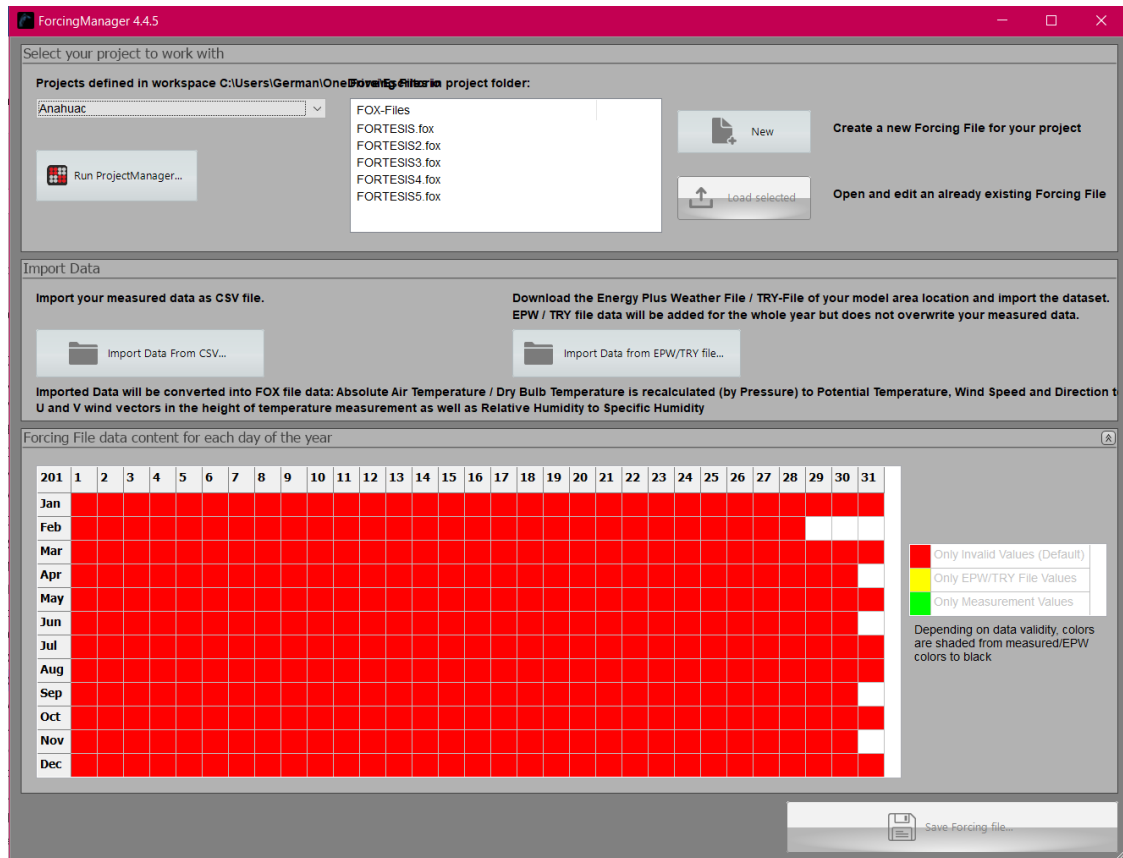


Figura 3.27. Sección de selección del tipo de importación de datos.

En la figura 3.28, se muestra la selección de la información del archivo CSV, indicando que los ajustes, que se aplicarán los datos insertados y también a que altura se encuentra cada parámetro medido.

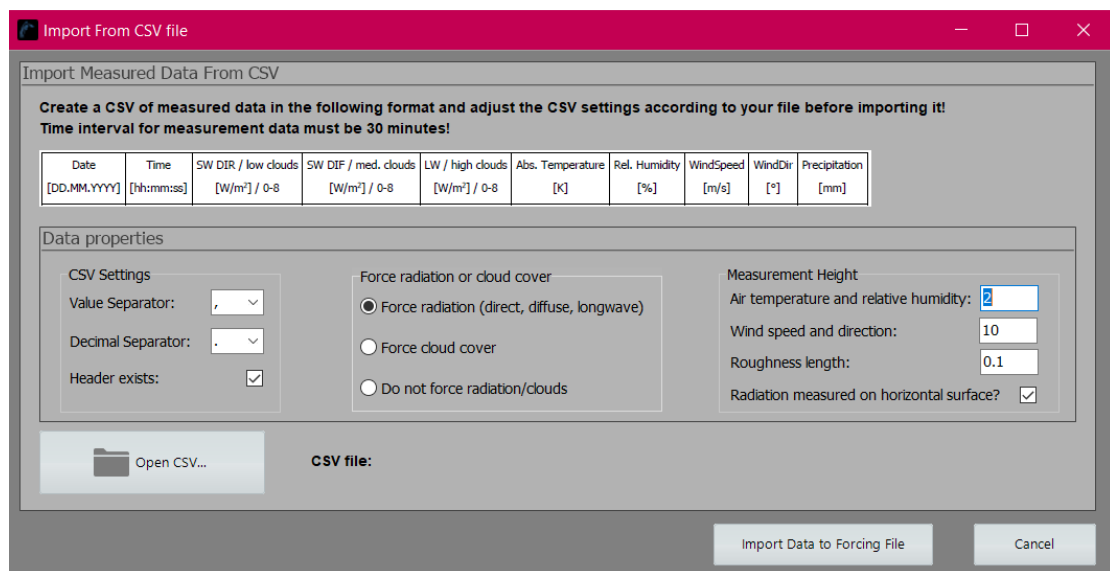


Figura 3.28. Importación de datos.

Ya que se aplicó la información, procedemos a verificar que todo se haya seleccionado correctamente. En la figura 3.29, observamos gráficamente información de la temperatura del aire, la humedad relativa, las radiaciones solares, la precipitación, así como la dirección y velocidad del viento que se aplicados.

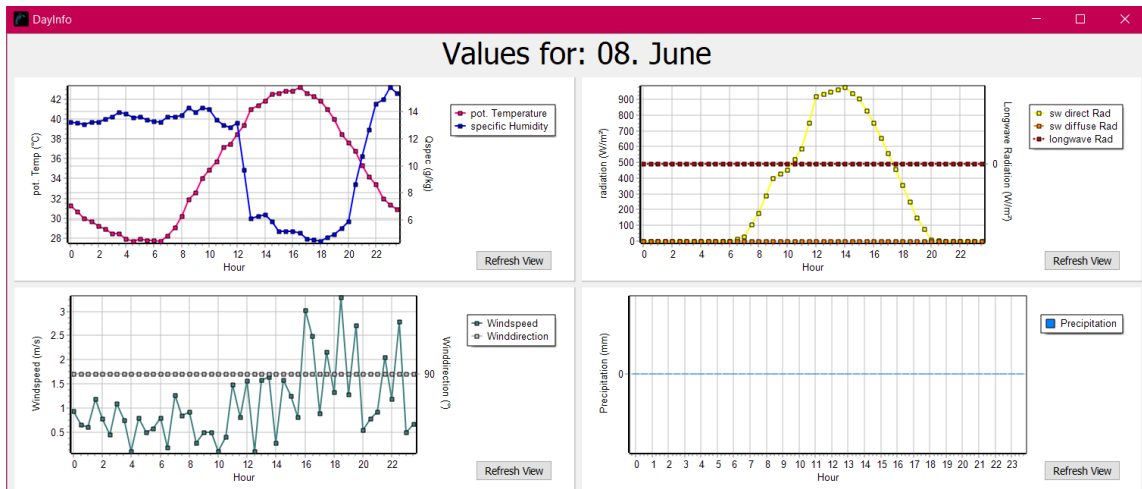


Figura 3.29. Visualización de datos.

Posteriormente, se cerciora que el archivo CSV se aplique por medio de la venta que aparece en la figura 3.30, así como indicar que se apliquen los datos importados.

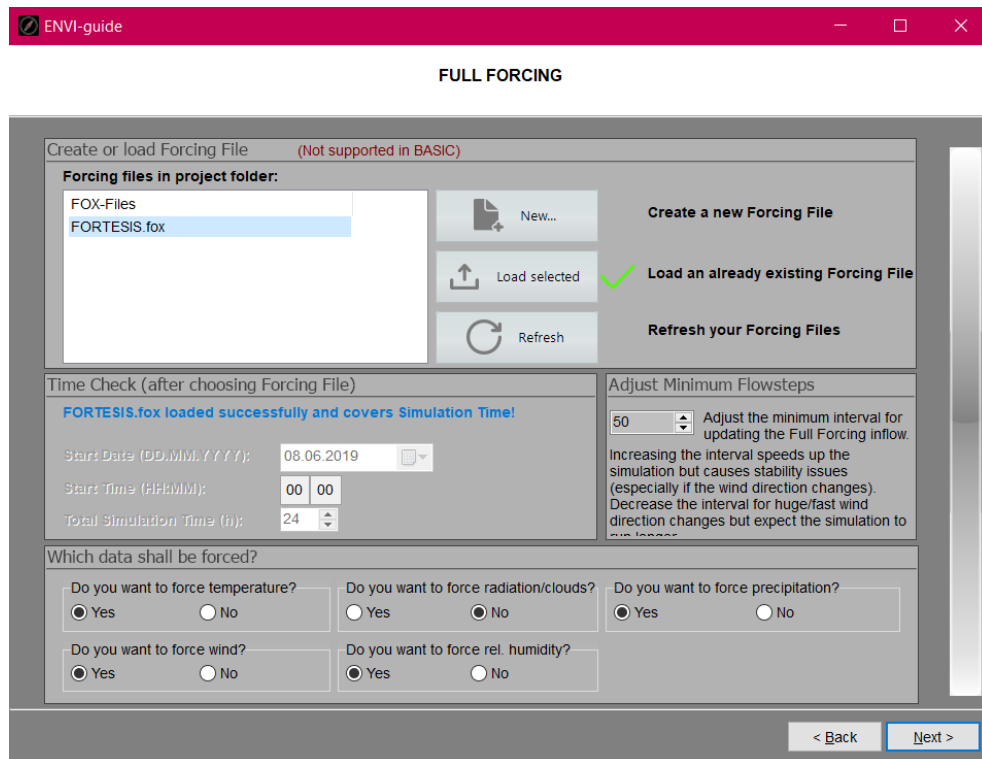


Figura 3.30. Selección de parámetros de importación de datos.

Finalmente, en la última parte de ENVI-Guide, se selecciona el proyecto que contiene la información de las características de los materiales (techos verdes, muros y techos convencionales), se carga la simulación y se procede a correr el modelo. Cuando termina la simulación, se muestra el resumen de la modelación, así como lo indica la figura 3.31.

```
ENVI-met: Tesis_TV.simx
Select ENVI-met project:
Anahuac
Load Simulation...
Check "Tesis_TV.simx"
Run "Tesis_TV.simx"
ENVI-met 4.4.5 (64bit)
STUDENT

ENVI-MET® V4.4.5 Summer20 © ENVI_MET GmbH Essen, Michael Bruse and Team, 1997-2020
Welcome to ENVI-met...

Number Cores/Threads Available: 1/25
Sorry, ENVI-met STUDENT does not support Multi-Core usage

%% Parsing: "C:\Users\German\OneDrive\Escritorio\Anahuac\Tesis_TV.simx" ...
:: -----
:: Model Loader: C:\Users\German\OneDrive\Escritorio\Anahuac\Tesis_v2_TechosVerdes.INX. Getting file...
:: -----
:: Model Description: [Add a remark]
:: Model Author: [Enter model author name]
:: Model_loader: Getting memory...
:: Model_loader: Clear memory...
:: Model_loader: Buildings 2D...
:: Model_loader: Simple plants (Matrix)...
:: Model_loader: 3D Plants...
:: Model_loader: Soil Profiles...
:: Model_loader: DEM...
:: Model_loader: Sources...
:: Model_loader: Detailed Building List...
:: Building List: Defines 7 Building(s)
:: Model_loader: Finished, cleaning up...
:: -----
:: Setting up full forcing...

$$ Grid Information:
$$ dxy(Main)=2.00 m Nesting:0 grids. dxy(Nest) m
$$ dz=3.00 (equidistant)
$$ Top of 3D Model is at 73.50 m height
$$ Highest object in model area is 10.00 m high

:: Setting up full forcing finished!
** Enabled FullForcing. Reading values... **
Reading Parallel CPU settings...
..Parallel CPUs/Threads on System : 8/25
..Parallel CPUs requested: 8
..Parallel CPUs used: 1
..Use multiple CPUs: OFF
```

Figura 3.31. Generación del modelo en fase terminada.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS DE ANÁLISIS A NIVEL MICRO ESCALA DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS

Los resultados obtenidos de la evaluación a nivel micro escala de los techos verdes extensivos, ilustraron por medio de gráficos mensuales y anuales, el comportamiento de la temperatura de los PTVE en comparación con un techo convencional.

En los apartados 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 y 4.1.4, se muestran los resultados de los datos obtenidos en primavera (abril y mayo de 2020), verano (junio, julio y agosto de 2020), otoño (octubre y noviembre de 2020) e invierno (diciembre de 2020, junto con enero, febrero y marzo de 2021), respectivamente. Estos resultados muestran el comportamiento de la temperatura máxima, mínima y promedio mensual obtenidos en los 6 sensores de temperatura a lo largo de las 24 horas del día a intervalos de 15 minutos. Posteriormente en el apartado 4.1.5, se muestra un resumen anual de los resultados de los 6 sensores de temperatura.

Gracias a lo anterior, fue posible determinar el porcentaje de reducción de temperatura de los PTVE en función de su profundidad de sustrato, así como el comportamiento térmico mensual, de esta manera, se determinó la profundidad del sustrato con mejor rendimiento térmico. Para mostrar mejor la eficiencia del PTVE en relación con el techo convencional, en el apartado 4.1.6, se muestra un resumen de ambos resultados. Posteriormente, por medio del análisis de la varianza por ANOVA, fue posible determinar si existe diferencias significativas de las muestras. Esto se representa en el apartado 4.1.7.

Cabe mencionar que, en los meses de abril, mayo, junio y julio, se contaron solamente con los sensores 1, 3, 4 y 6, por lo que no fue posible la obtención de temperatura del sensor instalado en el PTVE 1 ni en el PTVE 4. Asimismo, debido a problemas con el equipo, en el mes de septiembre no fue posible la recopilación de datos, siendo descartado ese mes.

4.1.1. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PTVE EN PRIMAVERA

Abril de 2020

La figura 4.1 muestra el comportamiento de los valores máximos de temperatura de los sensores 1, 3, 4 y 6 presentados en el mes de abril. Por medio del gráfico, se observan los cambios de temperatura de cada sensor con respecto al horario. De los sensores en cuestión, el sensor 6 (techo convencional) y el sensor 4 (profundidad del sustrato del PTVE de 15 cm), son los que destacan en su comportamiento. El sensor 6, muestra mayor sensibilidad a los incrementos y decrementos de temperatura, por el contrario, el sensor 4 tiene un comportamiento de mayor estabilidad a lo largo de las 24 horas del día.

Haciendo una comparación del tiempo que tarda en presentarse la temperatura máxima más baja a la más alta presentada en los sensores 6 y 4, es posible visualizar la magnitud de ambos cambios. En el caso del sensor 6, la temperatura máxima más baja es de 26.8°C a las 07:45 e incrementa a 55.4°C a las 14:15 horas, siendo un aumento de 28.6°C en 6 horas con 30 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura máxima más baja de 24.4°C a las 10:00 e incrementa a 39.8°C a las 16:15 horas, teniendo un aumento de 15.4°C en 6 horas y 15 minutos. Por tanto, la profundidad del sustrato de 15 cm, mantiene temperaturas menores al del techo convencional, así como mayor estabilidad en las variaciones de temperaturas máximas.

Por otro lado, cabe resaltar de la figura 4.1, que el sensor 1 (superficialmente en el PTVE) presenta un comportamiento similar al del sensor 6, con gran sensibilidad a los cambios de temperatura, pero, aun así, mantiene valores menores comparados a los de un techo convencional. En el sensor 3, presenta un comportamiento estable a los cambios de temperatura, siendo similar al sensor 4, pero con temperaturas ligeramente mayores.

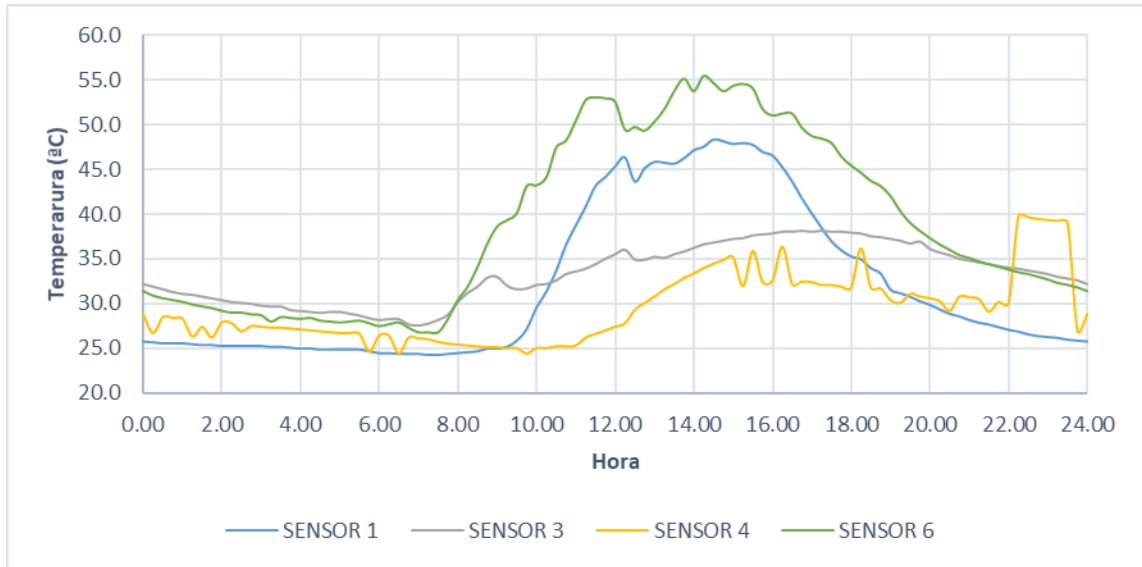


Figura 4.1. Valores máximos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de abril de 2020.

Por su parte la figura 4.2 muestra el comportamiento de los valores mínimos de temperatura. De los sensores en cuestión, al igual que en las temperaturas máximas, el sensor 6 y el sensor 4, son los que destacan en su comportamiento. El sensor 6, muestra mayor sensibilidad a los incrementos y decrementos de temperatura, por el contrario, el sensor 4 tiene un comportamiento de mayor estabilidad a lo largo de las 24 horas del día.

Haciendo una comparación del tiempo que tarda en presentarse la temperatura mínima más baja a la más alta presentada en los sensores 6 y 4, es posible visualizar la magnitud de ambos cambios. En el caso del sensor 6, su temperatura mínima más baja es de 12.3°C a las 07:15 e incrementa a 23.3°C a las 16:15 horas, siendo un aumento de 11.0°C en 9 horas. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura mínima más baja de 14.0°C a las 06:15 e incrementa a 17.6°C a las 19:15 horas, teniendo un aumento de 3.6°C en 13 horas. Por tanto, el sensor 4, mantiene un comportamiento más estable de las temperaturas en comparación del sensor 6 y, conserva temperaturas más calidas en los horarios con las menores temperaturas, y más bajas en los horarios con las temperaturas más altas.

Contrario a las temperaturas máximas, en las temperaturas mínimas, el sensor 1 y 3 se comportaron de diferente manera; mantuvieron mayor estabilidad comparado con el sensor 6, pero presentaron mayor sensibilidad que el sensor 4. Cabe resaltar que presentaron temperaturas más bajas que el sensor 4, lo cual es deseable mantenerlas más calidad en las temperaturas mínimas.

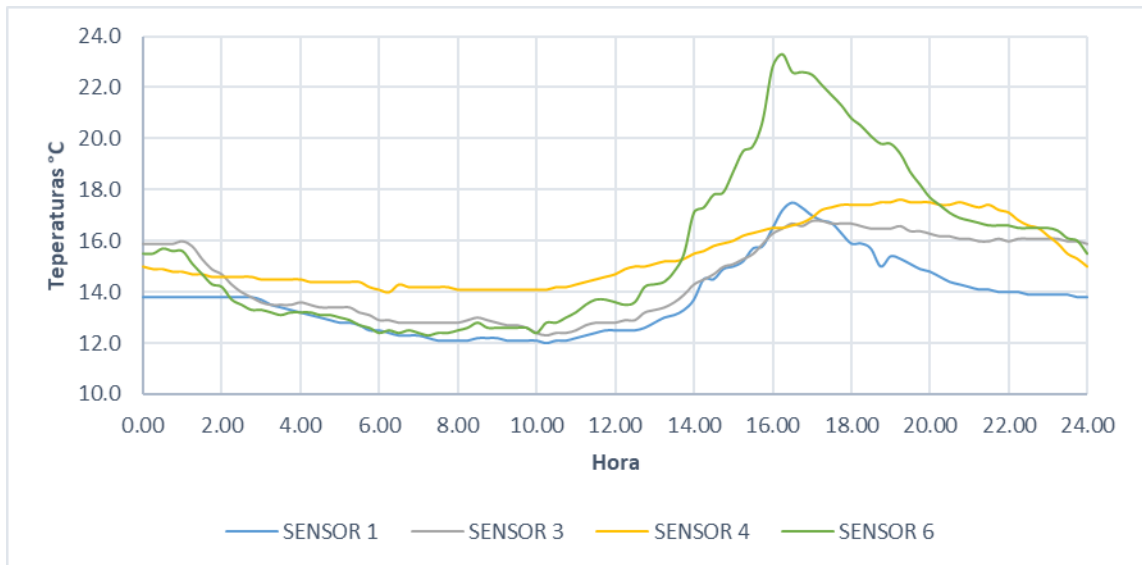


Figura 4.2. Valores mínimos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de abril de 2020.

La figura 4.3 muestra el comportamiento de los valores promedio de temperatura. Al igual que los casos anteriores, el sensor 6 y el sensor 4, son los que destacan en su comportamiento.

En este caso, su temperatura promedio más baja del sensor 6 es de 21.7°C a las 07:00 e incrementa a 42.3°C a las 15:00 horas, siendo un aumento de 20.6°C en 8 horas con 30 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura promedio más baja de 21.5°C a las 06:00 e incrementa a 28.8°C a las 16:15 horas, teniendo un aumento de 7.3°C 10 horas con 15 minutos. Por tanto, la profundidad del sustrato de 15 cm, mantiene temperaturas menores al del techo convencional, así como mayor estabilidad en las variaciones de temperaturas.

Por otro lado, cabe resaltar que el sensor 1 (superficialmente en el PTVE) presenta un comportamiento similar al del sensor 6, con gran sensibilidad a los cambios de

temperatura, pero, aun así, mantiene valores menores comparados a los de un techo convencional. En el sensor 3, presenta un comportamiento estable a los cambios de temperatura, siendo similar al sensor 4, pero con temperaturas ligeramente mayores.

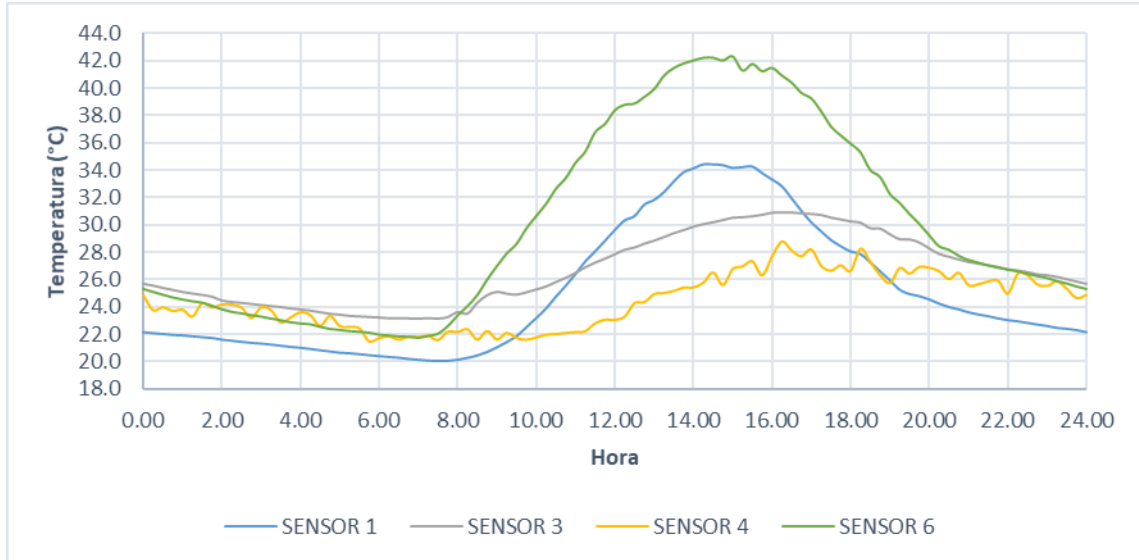


Figura 4.3. Valores promedio de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de abril de 2020.

Mayo de 2020

En el mes de mayo, el comportamiento de los sensores es similar el del mes de abril, donde el sensor 4 conserva mayor estabilidad en la temperatura a la profundidad que se encuentra, en comparación con los demás sensores, especialmente en el sensor 6.

En la figura 4.4, se observan los valores máximos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de mayo. El sensor 6, muestra su temperatura máxima más baja es de 26.7°C a las 07:15 e incrementa a 57.7°C a las 15:00 horas, siendo un aumento de 31.0°C en 7 horas con 45 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura máxima más baja de 25.2°C a las 09:45 e incrementa a 39.5°C a las 15:00 horas, teniendo un aumento de 14.3°C en 5 horas con 45 minutos.

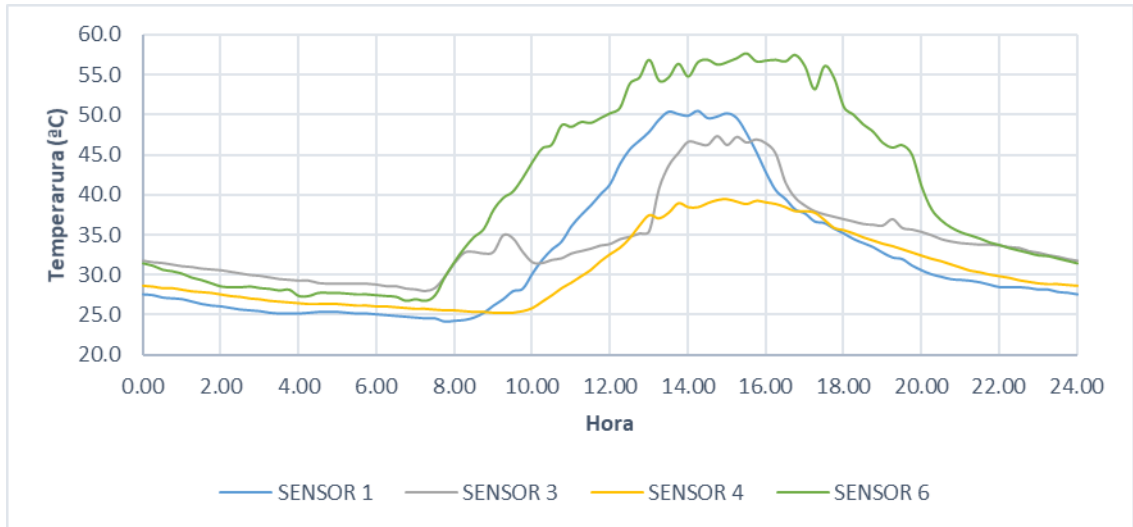


Figura 4.4. Valores máximos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de mayo de 2020.

En la figura 4.5, se observan los valores mínimos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de mayo. En el caso del sensor 6, su temperatura mínima más baja es de 18.2°C a las 06:45 e incrementa a 29.1°C a las 16:45 horas, siendo un aumento de 10.9°C en 10 horas. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura mínima más baja de 19.8°C a las 08:30 e incrementa a 29.3°C a las 17:15 horas, teniendo un aumento de 9.5°C en 8 horas con 45 minutos. Por tanto, el sensor 4, mantiene un comportamiento más estable de las temperaturas en comparación del sensor 6 y, conserva temperaturas más calidas en los horarios con las menores temperaturas, y más bajas en los horarios con las temperaturas más altas.

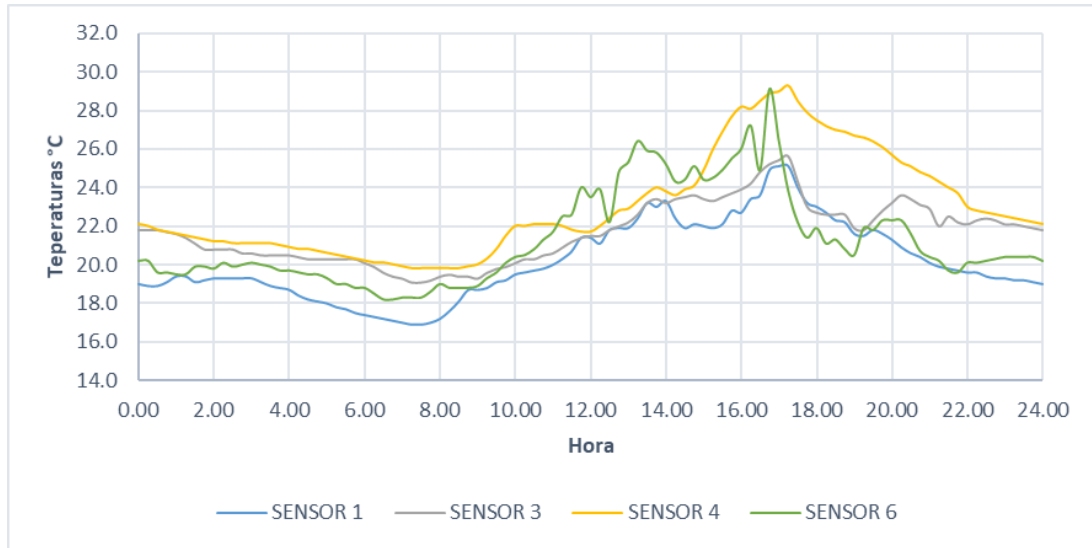


Figura 4.5. Valores mínimos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de mayo de 2020.

En el caso de las temperaturas promedio, el sensor 6 presenta la temperatura promedio más baja de 22.6°C a las 07:00 e incrementa a 48.0°C a las 15:30 horas, siendo un aumento de 25.4°C en 8 horas con 30 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura promedio más baja de 22.4°C a las 08:15 e incrementa a 34.9°C a las 15:45 horas, teniendo un aumento de 12.4°C en 7 horas con 30 minutos. Por tanto, la profundidad del sustrato de 15 cm, mantiene temperaturas menores al del techo convencional, así como mayor estabilidad en las variaciones de temperaturas (ver figura 4.6).

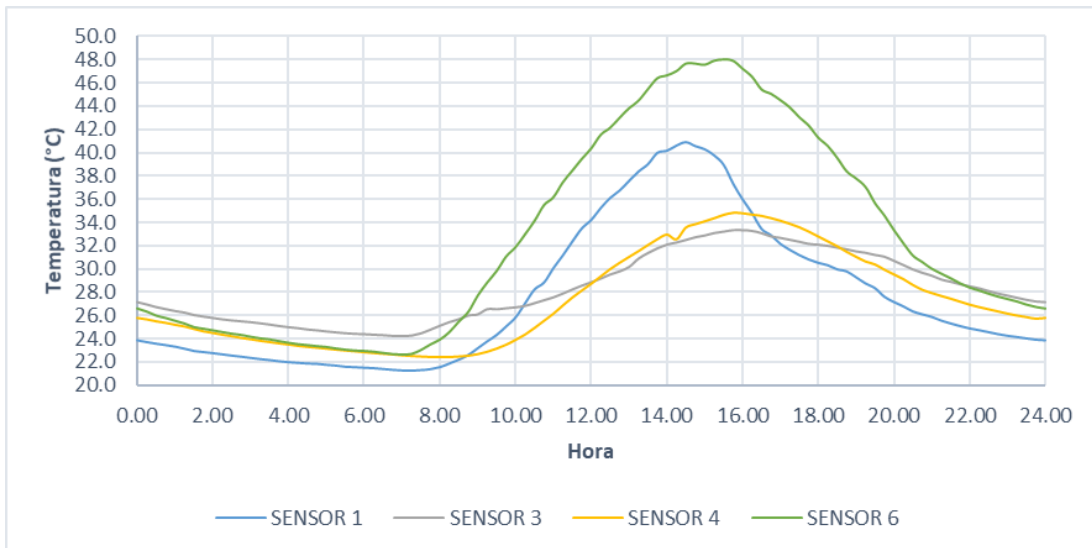


Figura 4.6. Valores promedio de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de mayo de 2020.

4.1.2. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PTVE EN VERANO

Junio de 2020

Verano es una de las épocas más calientes en el área de investigación, siendo junio el primer mes tomado en cuenta como verano. El comportamiento de los sensores es similar al de la época de primavera, donde el sensor 4 conserva mayor estabilidad en la temperatura a la profundidad que se encuentra, en comparación con los demás sensores, especialmente en el sensor 6.

En la figura 4.7, se observan los valores máximos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de junio. El sensor 6, muestra su temperatura máxima más baja es de 25.4°C a las 07:15 e incrementa a 58.0°C a las 16:00 horas, siendo un aumento de 32.6°C en 8 horas con 45 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura máxima más baja de 27.8°C a las 07:15 e incrementa a 38.3°C a las 17:00 horas, teniendo un aumento de 10.5°C en 9 horas con 45 minutos.

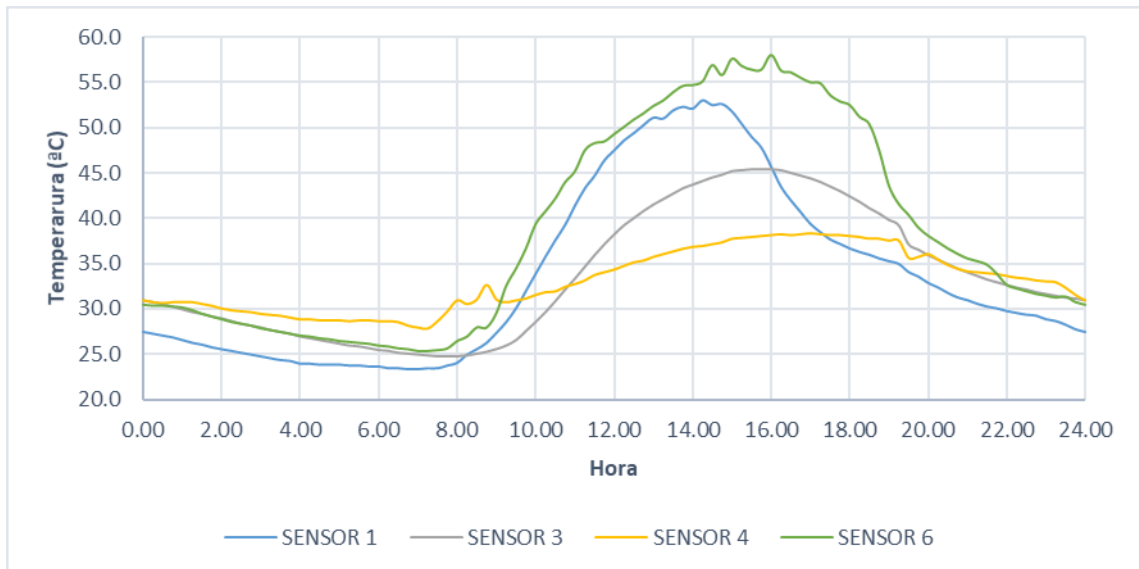


Figura 4.7. Valores máximos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de junio de 2020.

En la figura 4.8, se observan los valores mínimos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de mayo. En el caso del sensor 6, su temperatura mínima más baja es de 20.8°C a las 06:45 e incrementa a 45.2°C a las 15:00 horas, siendo un aumento

de 24.4°C en 8 horas con 15 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura mínima más baja de 21.7°C a las 07:00 e incrementa a 30.5°C a las 18:00 horas, teniendo un aumento de 8.8°C en 11 horas. Por tanto, el sensor 4, mantiene un comportamiento más estable de las temperaturas en comparación del sensor 6 y, conserva temperaturas más cálidas en los horarios con las menores temperaturas, y más bajas en los horarios con las temperaturas más altas.

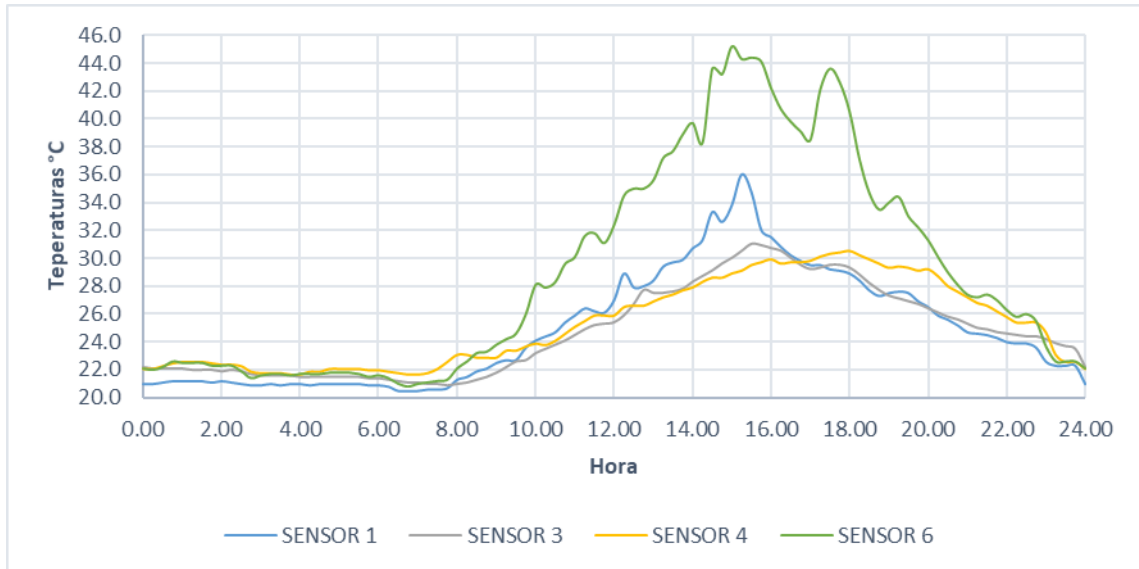


Figura 4.8. Valores mínimos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de junio de 2020.

En el caso de las temperaturas promedio, el sensor 6 presenta la temperatura promedio más baja de 24.0°C a las 07:00 e incrementa a 50.9°C a las 15:00 horas, siendo un aumento de 26.9°C en 8 horas. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura promedio más baja de 25.3°C a las 07:15 e incrementa a 33.8°C a las 17:15 horas, teniendo un aumento de 8.5°C en 10 horas. Por tanto, la profundidad del sustrato de 15 cm, mantiene temperaturas menores al del techo convencional, así como mayor estabilidad en las variaciones de temperaturas (ver figura 4.9).

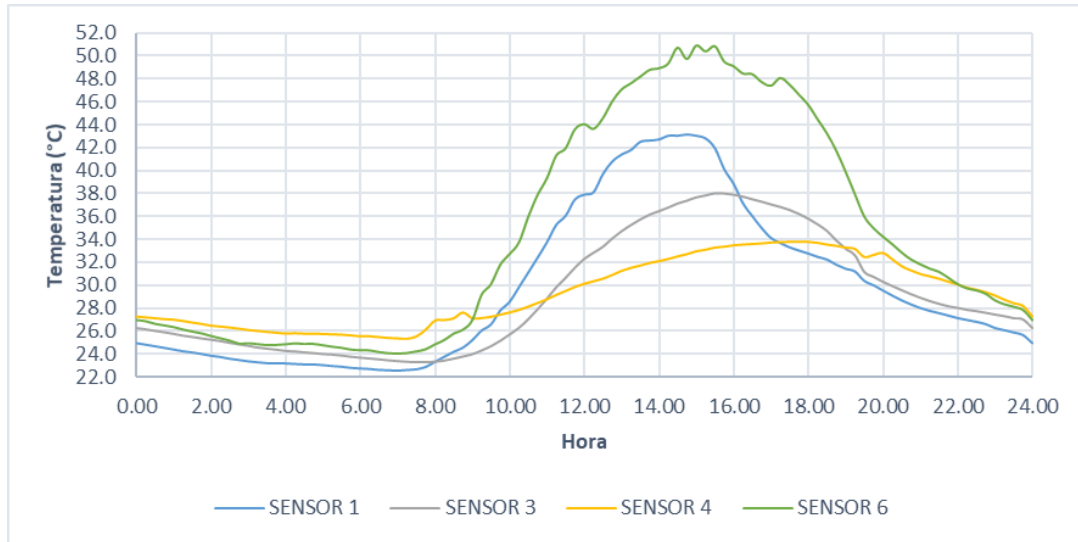


Figura 4.9. Valores promedio de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de junio de 2020.

Julio de 2020

En la figura 4.10, se observan los valores máximos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de julio. El sensor 6, muestra su temperatura máxima más baja es de 25.0°C a las 05:45 e incrementa a 60.6°C a las 12:45 horas, siendo un aumento de 35.6°C en 7 horas. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura máxima más baja de 27.1°C a las 08:30 e incrementa a 38.0°C a las 15:00 horas, teniendo un aumento de 10.9°C en 6 horas con 45 minutos.

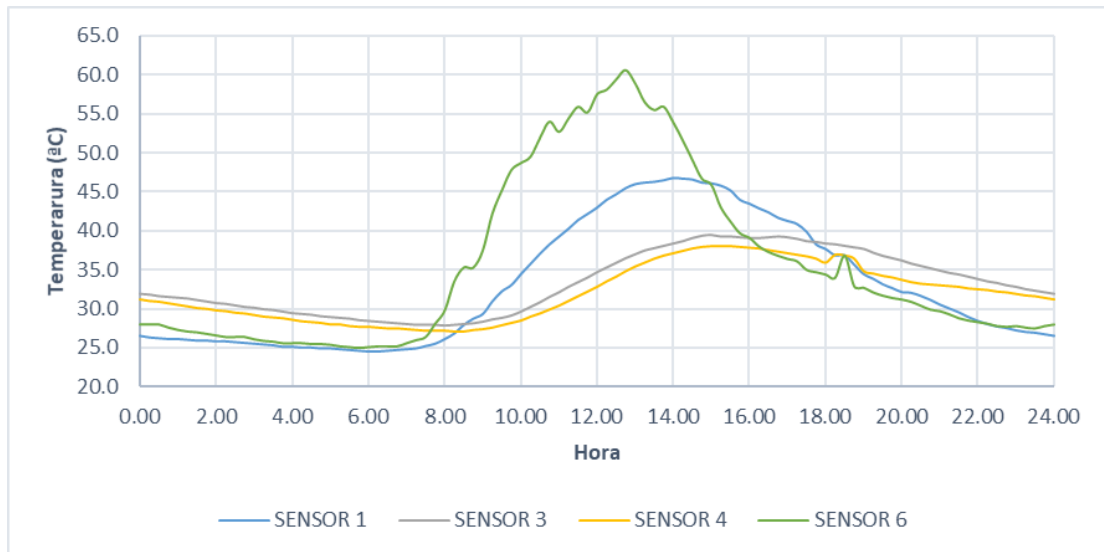


Figura 4.10. Valores máximos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de julio de 2020.

En la figura 4.11, se observan los valores mínimos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de julio. En el caso del sensor 6, su temperatura mínima más baja es de 20.7°C a las 00:30 e incrementa a 25.0°C a las 15:00 horas, siendo un aumento de 4.3°C en 14 horas con 30 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura mínima más baja de 21.6°C a las 11:45 e incrementa a 16.25°C a las 16:15 horas, teniendo un aumento de 2.4°C en 4 horas con 30 minutos. Por tanto, el sensor 4, mantiene un comportamiento más estable de las temperaturas en comparación del sensor 6 y, conserva temperaturas más calidas en los horarios con las menores temperaturas, y más bajas en los horarios con las temperaturas más altas.

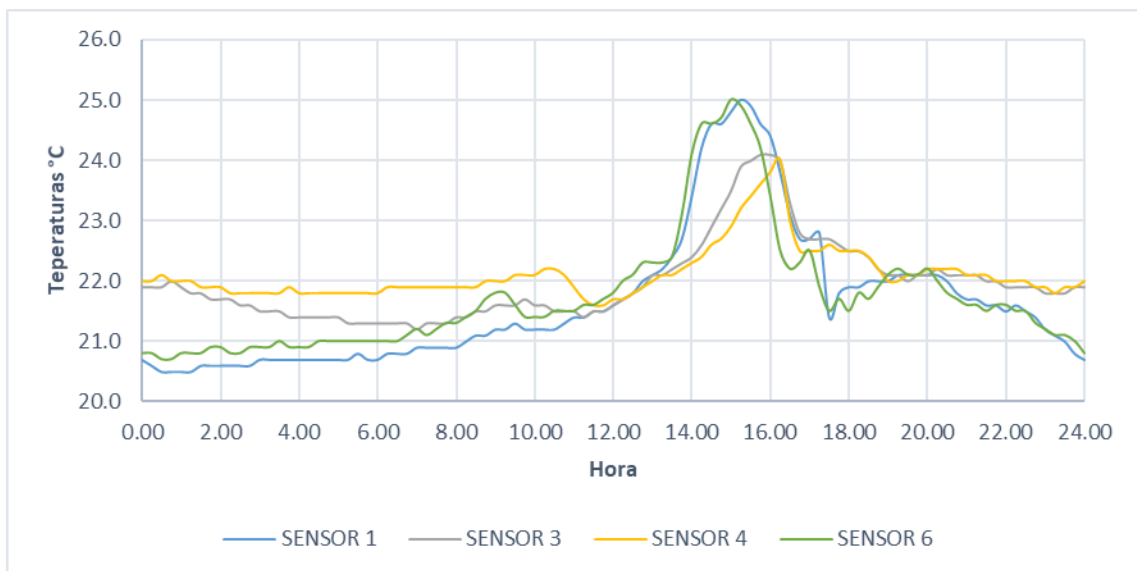


Figura 4.11. Valores mínimos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de julio de 2020.

En el caso de las temperaturas promedio, el sensor 6 presenta la temperatura promedio más baja de 22.8°C a las 06:15 e incrementa a 39.4°C a las 13:25 horas, siendo un aumento de 16.6°C en 7 horas. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura promedio más baja de 24.4°C a las 08:15 e incrementa a 30.7°C a las 15:30 horas, teniendo un aumento de 6.2°C en 7 horas con 15 minutos. Por tanto, la profundidad del sustrato de 15 cm, mantiene temperaturas menores al del techo convencional, así como mayor estabilidad en las variaciones de temperaturas (ver figura 4.12).

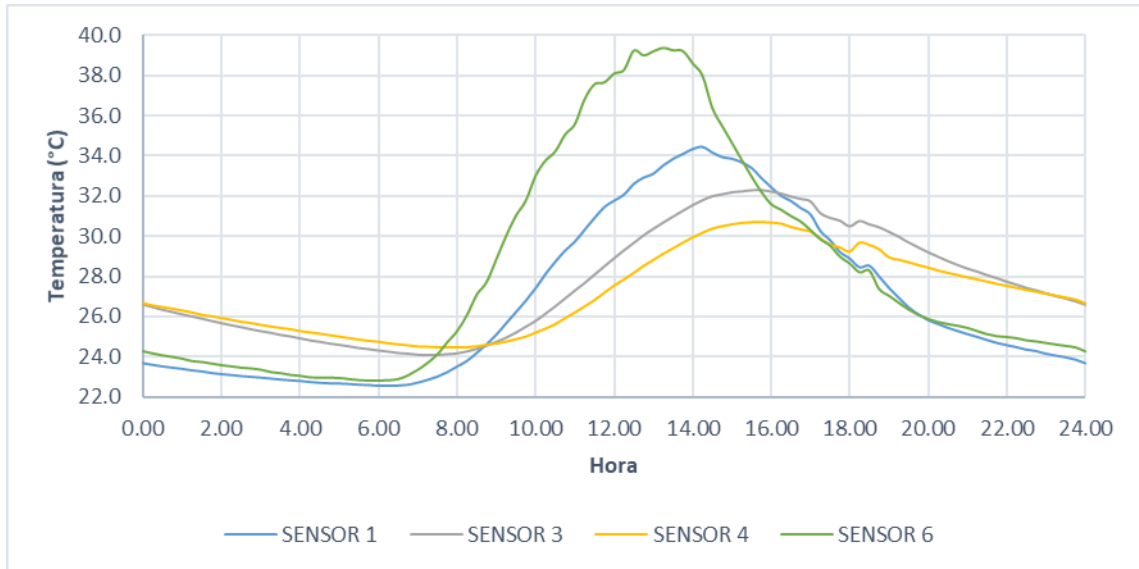


Figura 4.12. Valores promedio de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de julio de 2020.

Agosto de 2020

En el mes de agosto fue posible la instalación de los sensores 2 y 5 faltantes, por lo tanto, se consideraron en los siguientes meses consecutivos al presente. Aquí se puede observar el comportamiento de cada uno, que, de igual manera, el sensor 6 y 4, son los que tienen un comportamiento de mayor influencia.

En la figura 4.13, se observan los valores máximos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de agosto. El sensor 6, muestra su temperatura máxima más baja es de 25.0°C a las 06:00 e incrementa a 54.2°C a las 13:15 horas, siendo un aumento de 29.2°C en 7 horas con 15 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura máxima más baja de 25.8°C a las 09:00 e incrementa a 36.9°C a las 16:15 horas, teniendo un aumento de 11.1°C en 7 horas con 15 minutos.

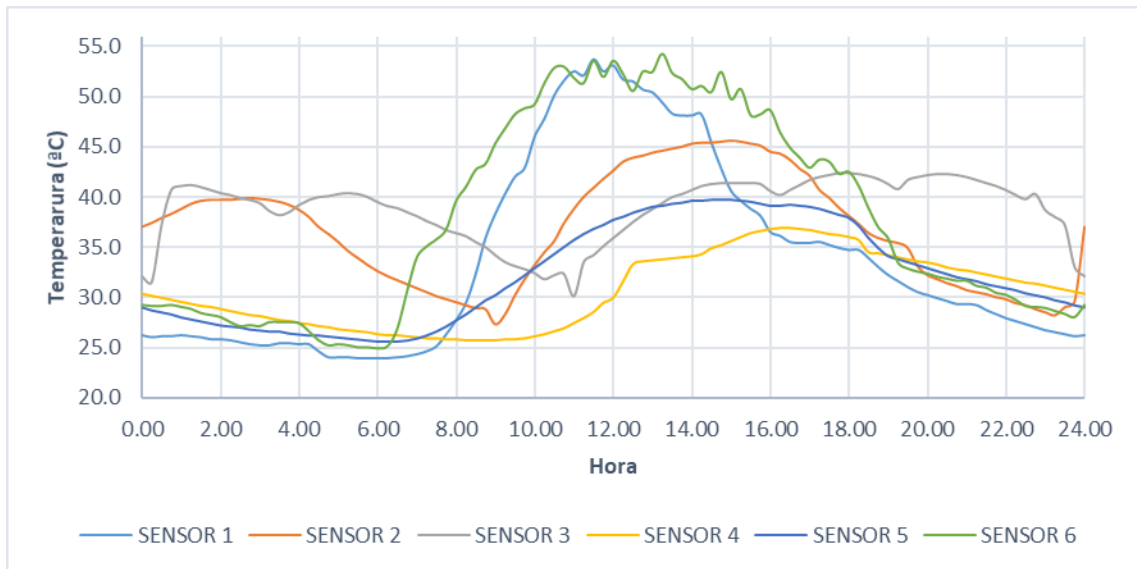


Figura 4.13. Valores máximos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de agosto de 2020.

En la figura 4.14, se observan los valores mínimos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de agosto. En el caso del sensor 6, su temperatura mínima más baja es de 20.7°C a las 06:15 e incrementa a 36.1°C a las 14:15 horas, siendo un aumento de 15.4°C en 8 horas. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura mínima más baja de 22.9°C a las 09:00 e incrementa a 29.6°C a las 16:00 horas, teniendo un aumento de 6.7°C en 7 horas. Por tanto, el sensor 4, mantiene un comportamiento más estable de las temperaturas en comparación del sensor 6 y, conserva temperaturas más cálidas en los horarios con las menores temperaturas, y más bajas en los horarios con las temperaturas más altas.

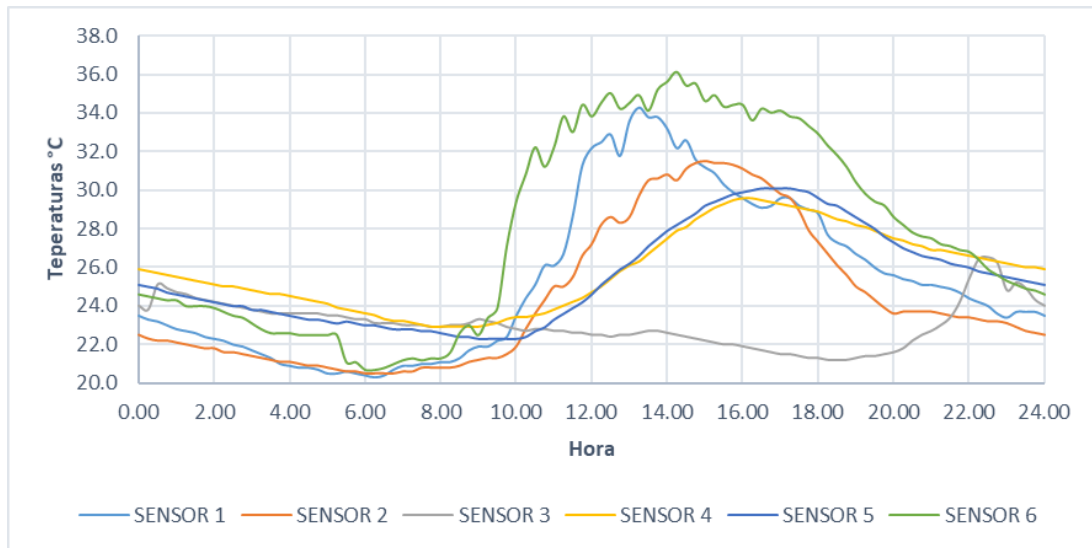


Figura 4.14. Valores mínimos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de agosto de 2020.

En el caso de las temperaturas promedio, el sensor 6 presenta la temperatura promedio más baja de 22.3°C a las 06:30 e incrementa a 44.2°C a las 12:00 horas, siendo un aumento de 21.9°C en 5 horas con 30 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura promedio más baja de 24.8°C a las 09:00 e incrementa a 33.5°C a las 16:00 horas, teniendo un aumento de 8.7°C en 7 horas. Por tanto, la profundidad del sustrato de 15 cm, mantiene temperaturas menores al del techo convencional, así como mayor estabilidad en las variaciones de temperaturas (ver figura 4.15).

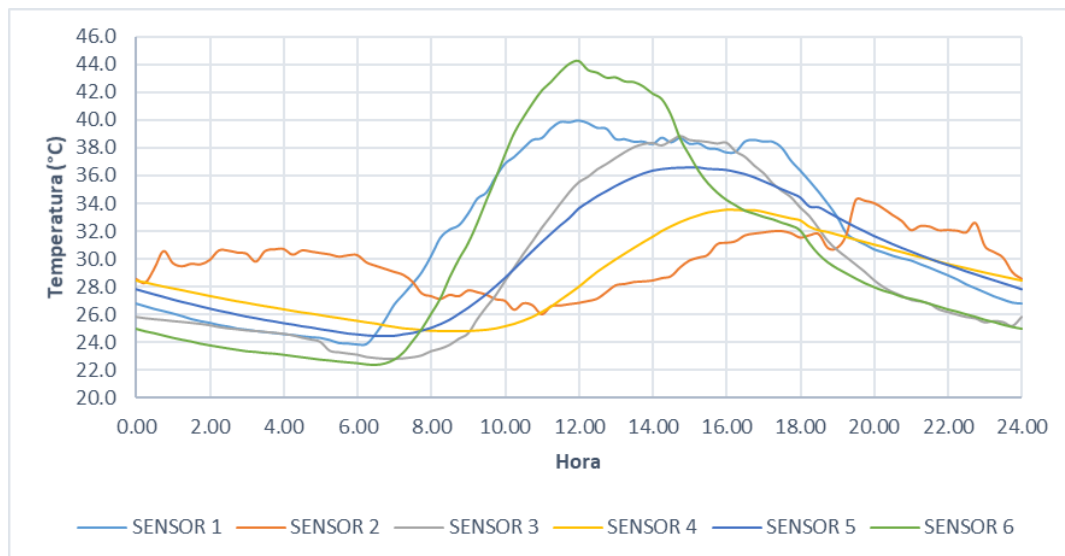


Figura 4.15. Valores promedio de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de agosto de 2020.

4.1.3. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PTVE EN OTOÑO

Octubre de 2020

Otoño es la siguiente época del año que se recopiló información, siendo octubre el primer mes tomado en cuenta como verano. El comportamiento de los sensores es similar al de la época de primavera, donde el sensor 4 conserva mayor estabilidad en la temperatura a la profundidad que se encuentra, en comparación con los demás sensores, especialmente en el sensor 6.

En la figura 4.16, se observan los valores máximos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de octubre. El sensor 6, muestra su temperatura máxima más baja es de 24.1°C a las 06:45 e incrementa a 54.6°C a las 15:30 horas, siendo un aumento de 30.5°C en 8 horas con 45 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura máxima más baja de 24.3°C a las 11:45 e incrementa a 36.2°C a las 18:45 horas, teniendo un aumento de 11.9°C en 8 horas con 45 minutos.

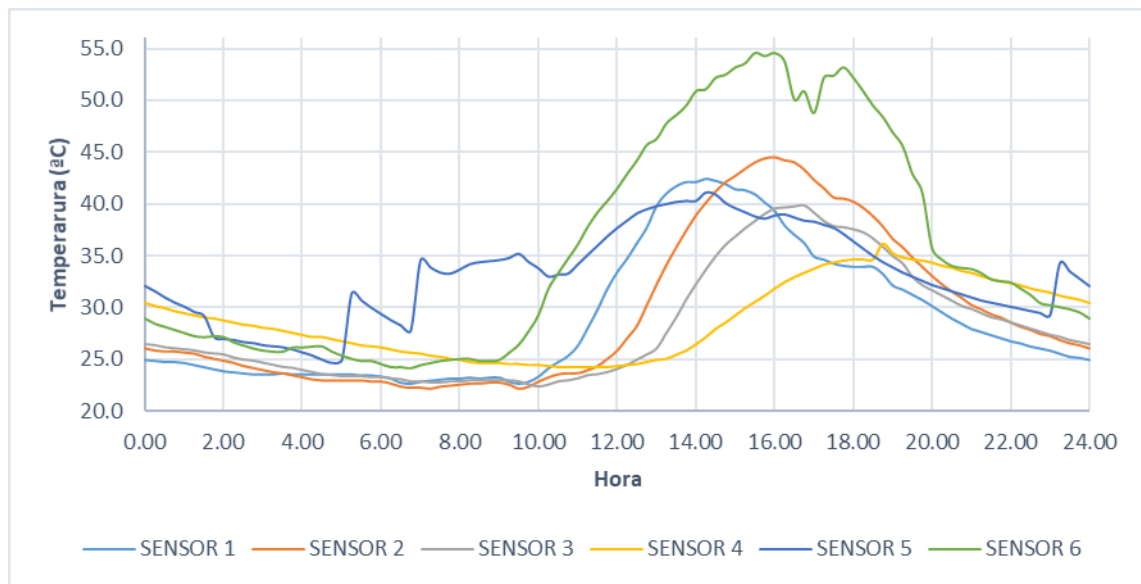


Figura 4.16. Valores máximos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de octubre de 2020.

En la figura 4.14, se observan los valores mínimos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de octubre. En el caso del sensor 6, su temperatura mínima

más baja es de 7.4°C a las 04:30 e incrementa a 16.6°C a las 15:00 horas, siendo un aumento de 9.2°C en 10 horas con 30 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura mínima más baja de 9.1°C a las 11:00 e incrementa a 15.9°C a las 15:45 horas, teniendo un aumento de 6.8°C en 4 horas con 45 minutos. Por tanto, el sensor 4, mantiene un comportamiento más estable de las temperaturas en comparación del sensor 6 y, conserva temperaturas más calidas en los horarios con las menores temperaturas, y más bajas en los horarios con las temperaturas más altas.

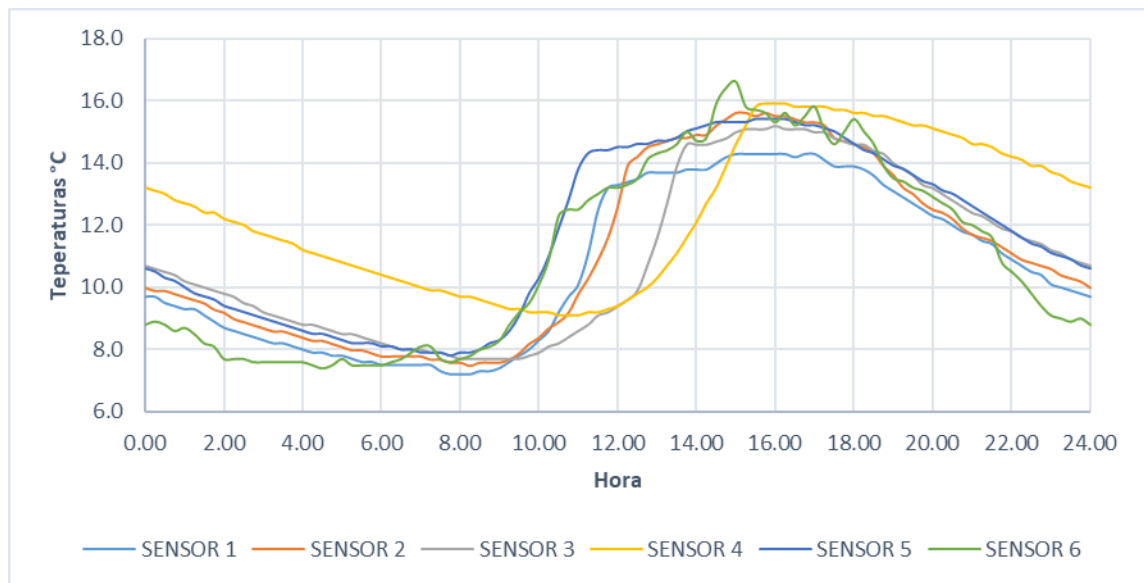


Figura 4.17. Valores mínimos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de octubre de 2020.

En el caso de las temperaturas promedio, el sensor 6 presenta la temperatura promedio más baja de 20.2°C a las 08:45 e incrementa a 44.9°C a las 15:30 horas, siendo un aumento de 25.7°C en 6 horas con 45 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura promedio más baja de 20.2°C a las 11:45 e incrementa a 28.2°C a las 18:45 horas, teniendo un aumento de 8.0°C en 7 horas. Por tanto, la profundidad del sustrato de 15 cm, mantiene temperaturas menores al del techo convencional, así como mayor estabilidad en las variaciones de temperaturas (ver figura 4.18).

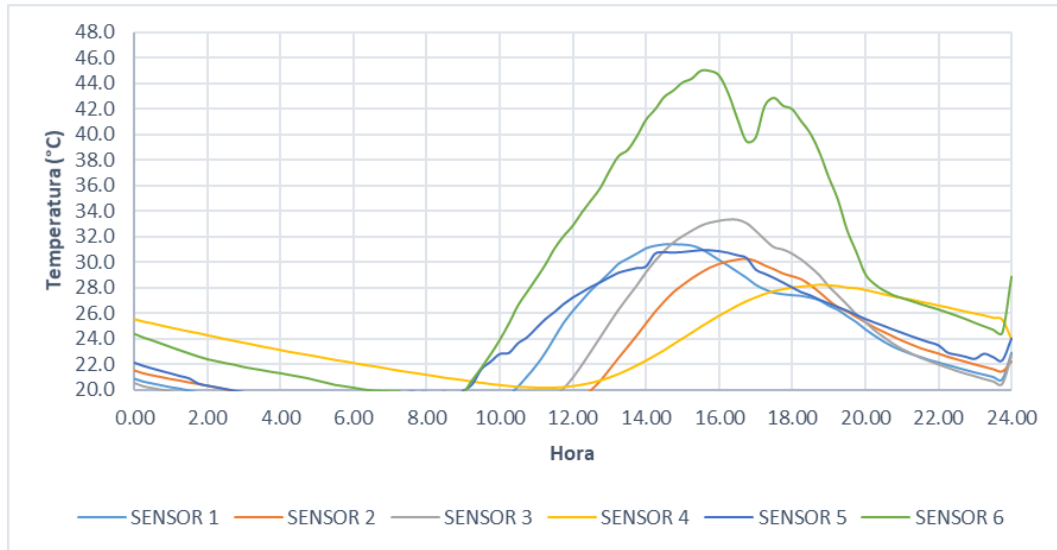


Figura 4.18. Valores promedio de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de octubre de 2020.

Noviembre de 2020

En la figura 4.19, se observan los valores máximos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de noviembre. El sensor 6, muestra su temperatura máxima más baja es de 21.9°C a las 09:00 e incrementa a 49.5°C a las 14:30 horas, siendo un aumento de 27.6°C en 5 horas con 30 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura máxima más baja de 22.1°C a las 12:00 e incrementa a 29.2°C a las 17:30 horas, teniendo un aumento de 7.1°C en 5 horas con 30 minutos.

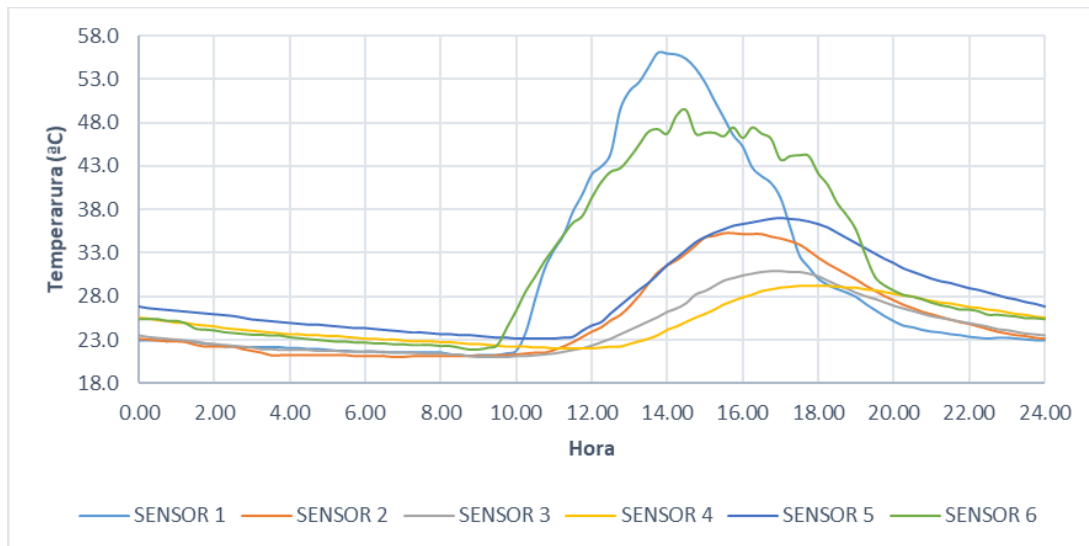


Figura 4.19. Valores máximos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de noviembre de 2020.

En la figura 4.20, se observan los valores mínimos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de noviembre. En el caso del sensor 6, su temperatura mínima más baja es de 10.3°C a las 08:00 e incrementa a 23.0°C a las 17:30 horas, siendo un aumento de 12.7°C en 9 horas con 30 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura mínima más baja de 11.9°C a las 11:45 e incrementa a 21.0°C a las 19:00 horas, teniendo un aumento de 9.1°C en 7 horas con 15 minutos. Por tanto, el sensor 4, mantiene un comportamiento más estable de las temperaturas en comparación del sensor 6 y, conserva temperaturas más calidas en los horarios con las menores temperaturas, y más bajas en los horarios con las temperaturas más altas.

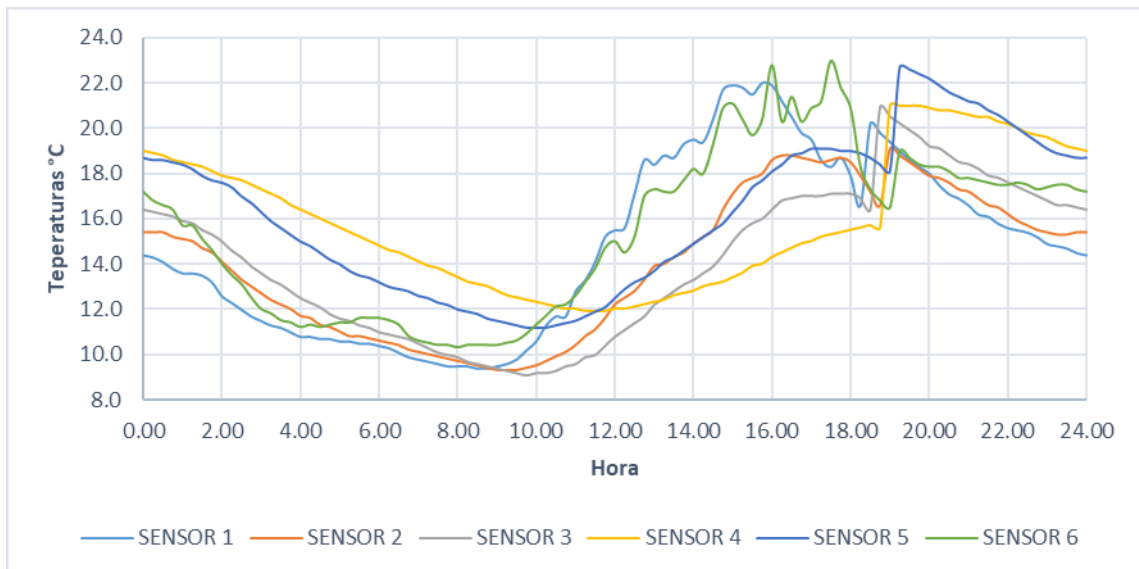


Figura 4.20. Valores mínimos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de noviembre de 2020.

En el caso de las temperaturas promedio, el sensor 6 presenta la temperatura promedio más baja de 17.4°C a las 08:45 e incrementa a 38.6°C a las 15:45 horas, siendo un aumento de 21.2°C en 7 horas. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura promedio más baja de 18.2°C a las 10:45 e incrementa a 25.4°C a las 19:00 horas, teniendo un aumento de 7.1°C en 8 horas con 15 minutos. Por tanto, la profundidad del sustrato de 15 cm, mantiene temperaturas menores al del techo convencional, así como mayor estabilidad en las variaciones de temperaturas (ver figura 4.21).

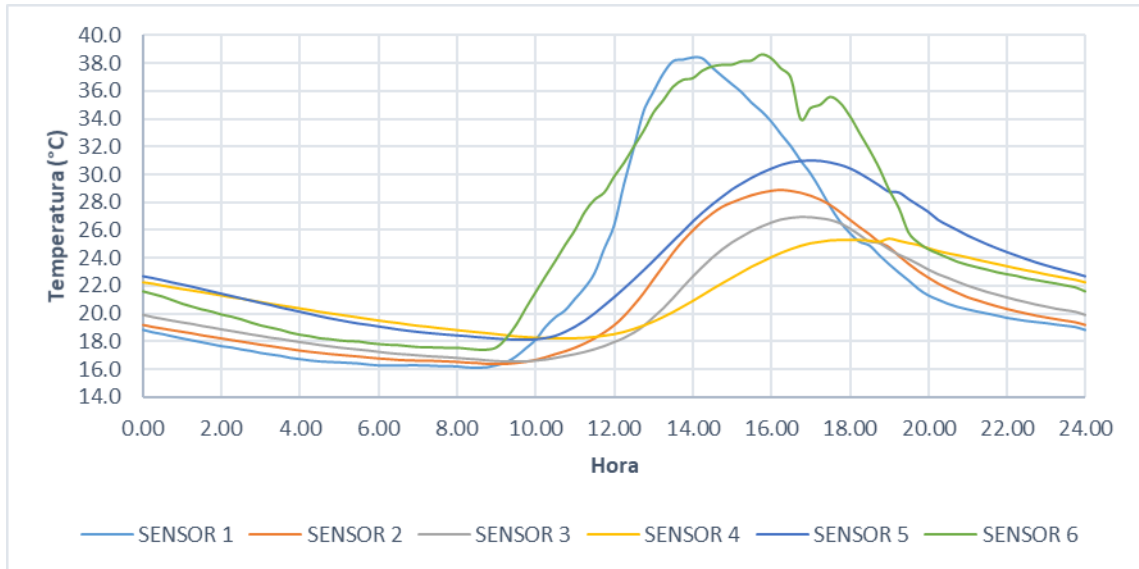


Figura 4.21. Valores promedio de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de noviembre de 2020.

4.1.4. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PTVE EN INVIERNO

Diciembre de 2020

Invierno es la siguiente etapa más fría en el área de investigación, siendo diciembre el primer mes de la estación. El comportamiento de los sensores es similar a las demás estaciones, donde el sensor 4 conserva mayor estabilidad en la temperatura a la profundidad que se encuentra, en comparación con los demás sensores, especialmente en el sensor 6.

En la figura 4.22, se observan los valores máximos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de diciembre. El sensor 6, muestra su temperatura máxima más baja es de 18.6°C a las 09:15 e incrementa a 54.9°C a las 15:15 horas, siendo un aumento de 36.3°C en 6 horas. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura máxima más baja de 19.1°C a las 11:45 e incrementa a 25.0°C a las 18:15 horas, teniendo un aumento de 5.9°C en 6 horas con 30 minutos.

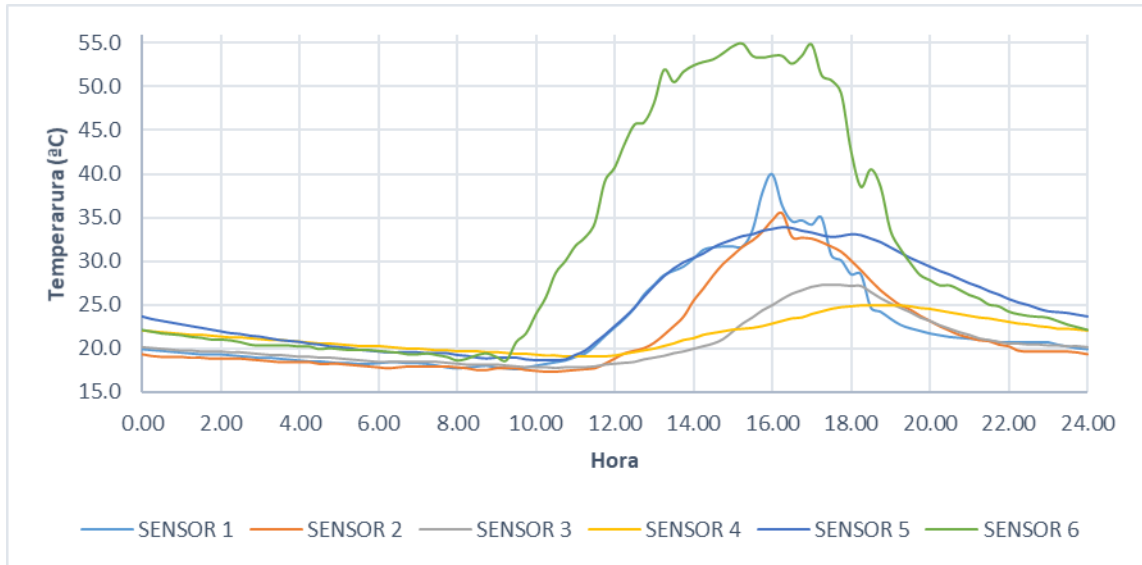


Figura 4.22. Valores máximos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de diciembre de 2020.

A partir del mes de diciembre, en las temperaturas mínimas presentadas en el mes, el comportamiento térmico de los techos verdes comienza a tomar una característica distinta a las épocas de primavera, verano y otoño, ya que, en la figura 4.23, se observa que los techos verdes, en especial PTVE 3 con el sensor 4, mantiene temperaturas más cálidas que las de un techo convencional, a excepción de las de mayor temperatura. En las épocas de invierno es posible ver que se mantiene con mayor estabilidad la variabilidad de temperatura a lo largo del día. En el caso del sensor 6, su temperatura mínima más baja es de 0.0°C a las 07:45 e incrementa a 10.8°C a las 16:45 horas, siendo un aumento de 33.5°C en 9 horas. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura mínima más baja de 5.6°C a las 12:00 e incrementa a 14.3°C a las 19:30 horas, teniendo un aumento de 8.7°C en 7 horas con 30 minutos. Por tanto, el sensor 4, mantiene un comportamiento más estable de las temperaturas en comparación del sensor 6 y, conserva temperaturas más cálidas en los horarios con las menores temperaturas, y más bajas en los horarios con las temperaturas más altas.

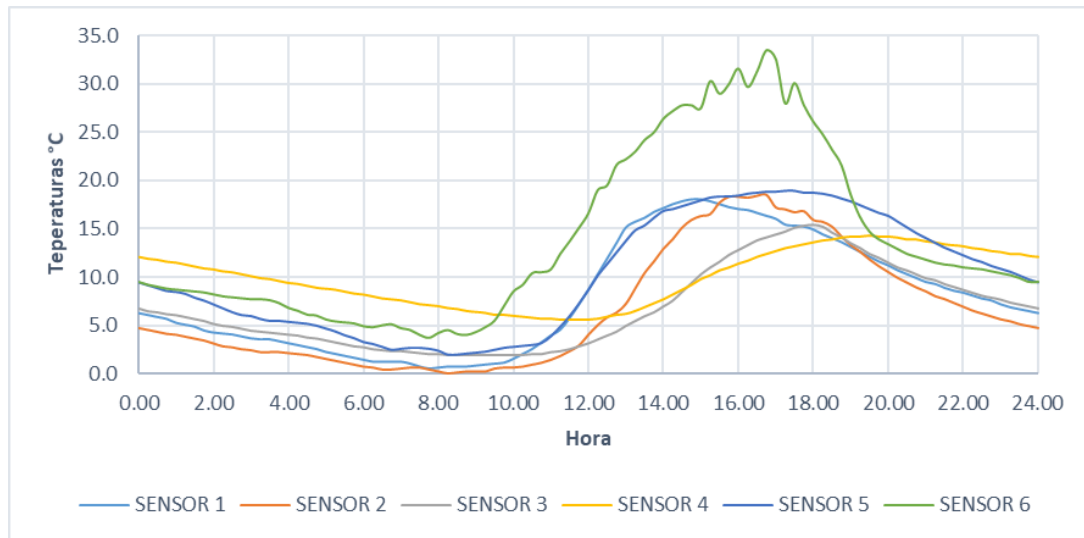


Figura 4.23. Valores mínimos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de diciembre de 2020.

En el caso de las temperaturas promedio, el sensor 6 presenta la temperatura promedio más baja de 10.3°C a las 09:45 e incrementa a 42.5°C a las 15:00 horas, siendo un aumento de 32.2°C en 5 horas con 15 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura promedio más baja de 11.4°C a las 11:45 e incrementa a 19.9°C a las 18:30 horas, teniendo un aumento de 8.5°C en 6 horas con 45 minutos. Por tanto, la profundidad del sustrato de 15 cm, mantiene temperaturas menores al del techo convencional, así como mayor estabilidad en las variaciones de temperaturas (ver figura 4.24).

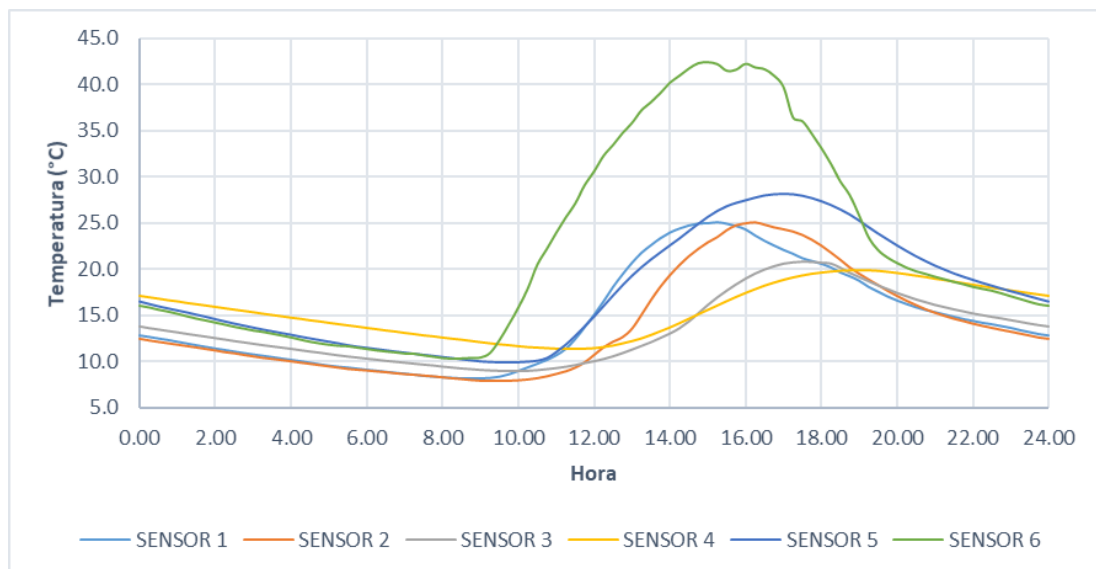


Figura 4.24. Valores promedio de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de diciembre de 2020.

Enero de 2021

En la figura 4.25, se observan los valores máximos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de enero. El sensor 6, muestra su temperatura máxima más baja es de 19.7°C a las 09:45 e incrementa a 47.1°C a las 15:30 horas, siendo un aumento de 27.4°C en 5 horas con 45 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura máxima más baja de 18.5°C a las 11:15 e incrementa a 27.4°C a las 18:30 horas, teniendo un aumento de 8.9°C en 7 horas con 15 minutos.

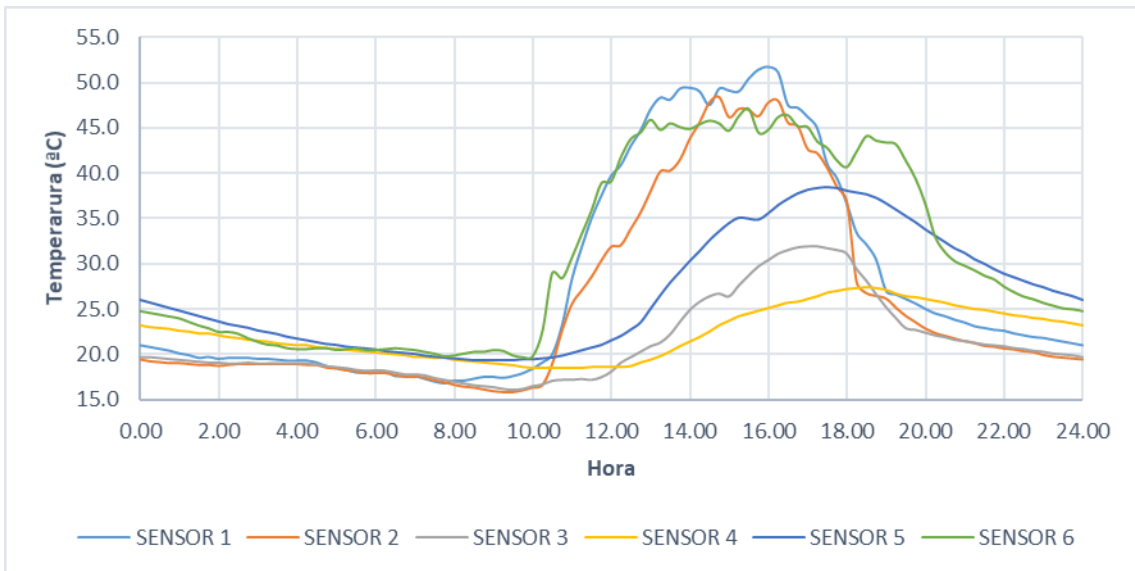


Figura 4.25. Valores máximos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de enero de 2021.

Al igual que en diciembre, en enero se tiene un comportamiento similar en las temperaturas mínimas del mes, manteniendo el PTVE 3 temperaturas más cálidas en horario nocturno y ligeramente más bajas en el horario diurno en comparación con el techo convencional (ver figura 4.26). En el caso del sensor 6, su temperatura mínima más baja es de 3.7°C a las 07:45 e incrementa a 10.8°C a las 17:00 horas, siendo un aumento de 7.1°C en 9 horas con 15 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura mínima más baja de 4.2°C a las 10:15 e incrementa a 7.4°C a las 18:45 horas, teniendo un aumento de 3.2°C en 8 horas con 30 minutos.

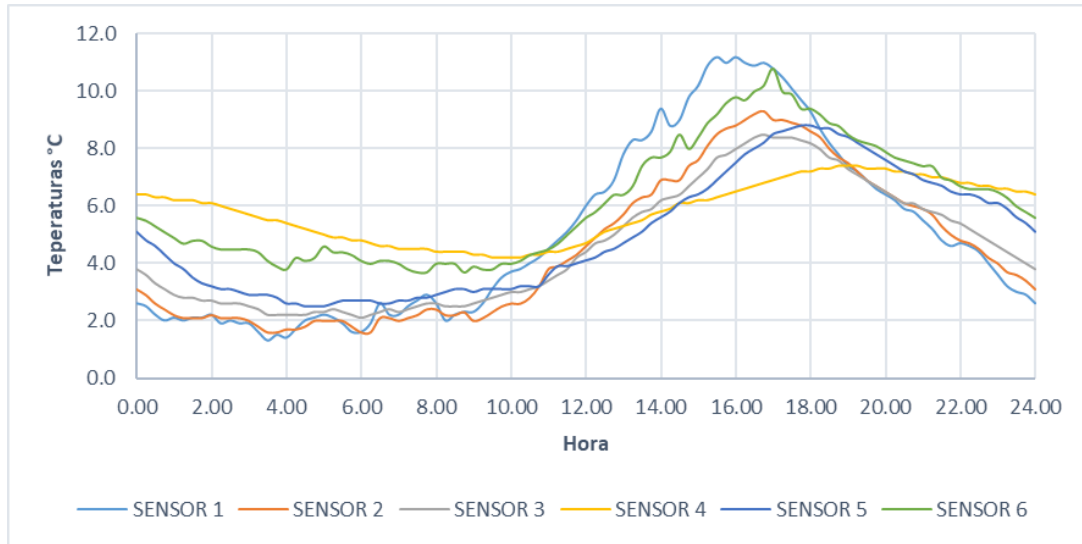


Figura 4.26. Valores mínimos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de enero de 2021.

En el caso de las temperaturas promedio, el sensor 6 presenta la temperatura promedio más baja de 11.1°C a las 09:30 e incrementa a 31.7°C a las 16:15 horas, siendo un aumento de 20.6°C en 6 horas con 45 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura promedio más baja de 11.5°C a las 11:30 e incrementa a 20.1°C a las 18:15 horas, teniendo un aumento de 8.6°C en 6 horas con 45 minutos. Por tanto, la profundidad del sustrato de 15 cm, mantiene temperaturas menores al del techo convencional, así como mayor estabilidad en las variaciones de temperaturas (ver figura 4.27).

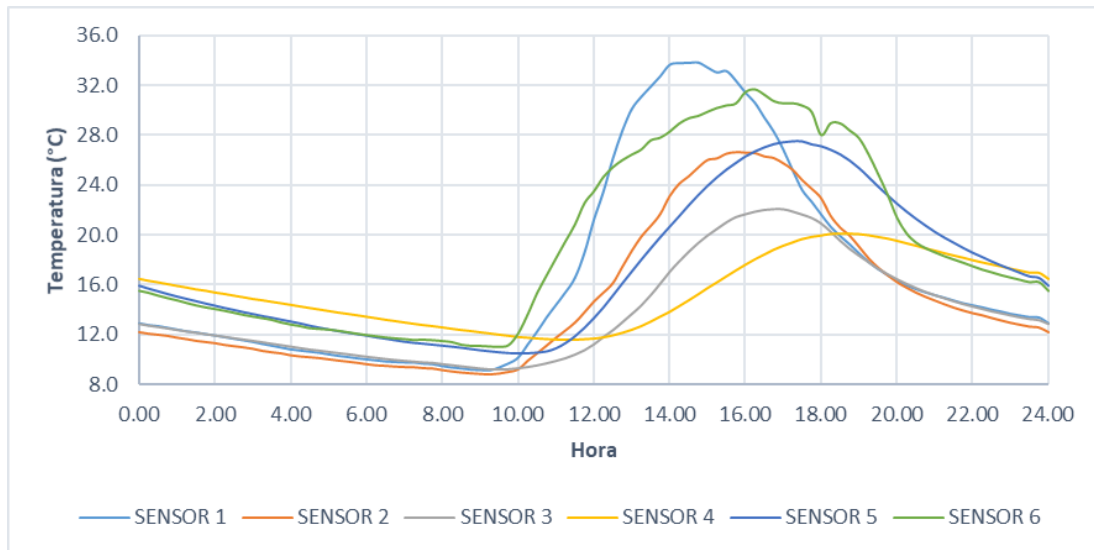


Figura 4.27. Valores promedio de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de enero de 2021.

Febrero de 2021

En la figura 4.28, se observan los valores máximos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de febrero. El sensor 6, muestra su temperatura máxima más baja es de 19.7°C a las 09:00 e incrementa a 50.5°C a las 15:00 horas, siendo un aumento de 30.8°C en 6 horas. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura máxima más baja de 20.1°C a las 10:45 e incrementa a 29.8°C a las 18:00 horas, teniendo un aumento de 9.7°C en 7 horas con 15 minutos.

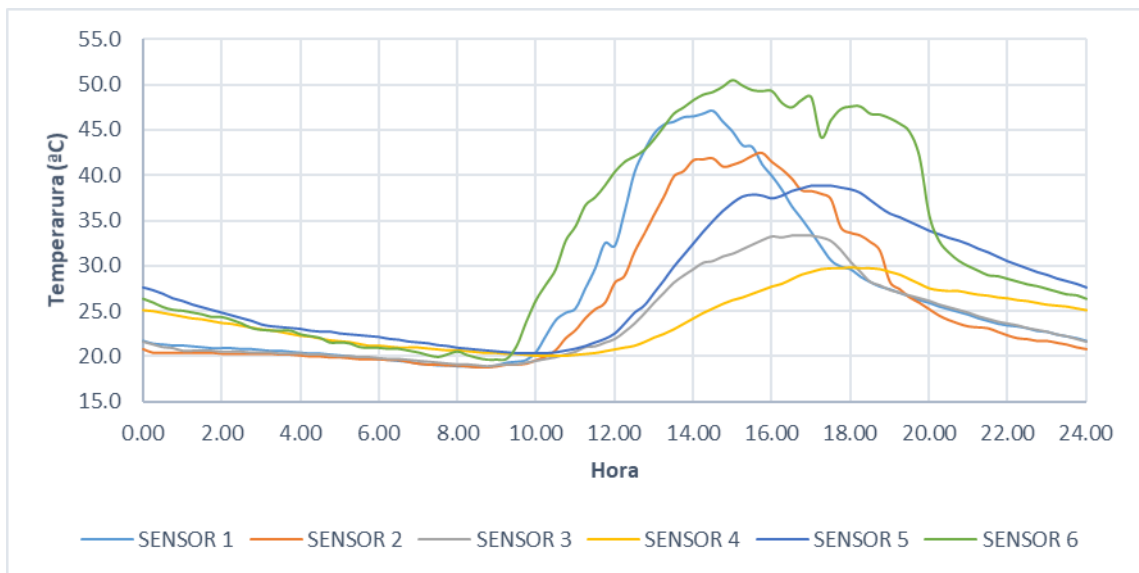


Figura 4.28. Valores máximos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de febrero de 2021.

Febrero es el mes que menores temperatura presentó, siendo incluso menores a los 0°C, pero como se observa en la figura 4.29, el PTVE fue posible mantener las temperaturas por encima de los 0°C y con un comportamiento más estable, aun tomando en cuenta que la temperatura más baja en el techo convencional fue de -4.8°C. El sensor 6, su temperatura mínima más baja es de -4.8°C a las 10:15 e incrementa a 5.9°C a las 16:00 horas, siendo un aumento de 10.7°C en 5 horas con 45 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura mínima más baja de 0.2°C a las 13:00 e incrementa a 2.7°C a las 19:15 horas, teniendo un aumento de 2.5°C en 6 horas con 45 minutos.

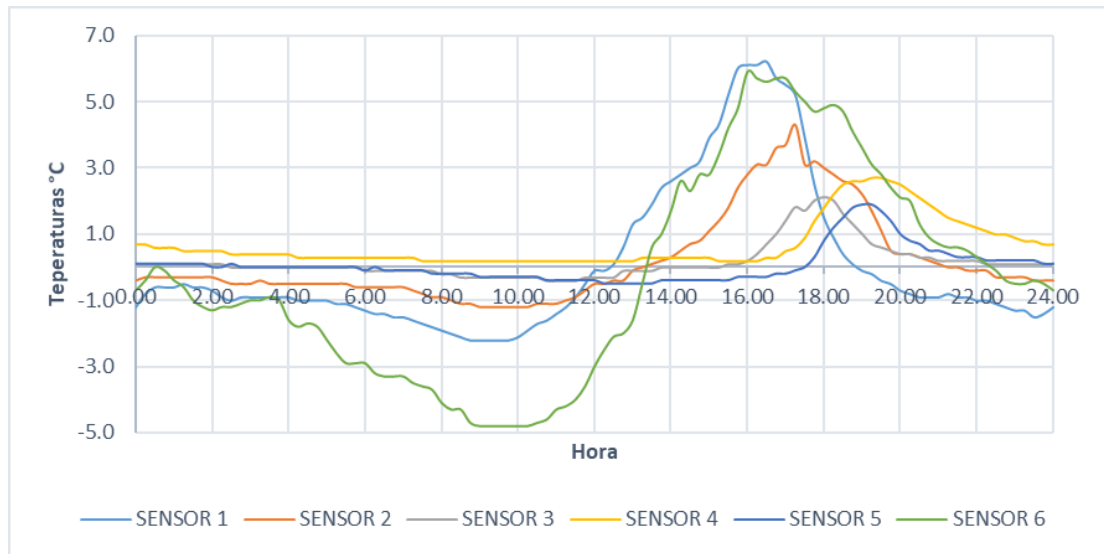


Figura 4.29. Valores mínimos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de febrero de 2021.

En el caso de las temperaturas promedio, el sensor 6 presenta la temperatura promedio más baja de 11.1°C a las 09:00 e incrementa a 33.7°C a las 15:30 horas, siendo un aumento de 22.5°C en 6 horas con 30 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura promedio más baja de 12.2°C a las 11:00 e incrementa a 20.5°C a las 17:45 horas, teniendo un aumento de 8.3°C en 6 horas con 45 minutos. Por tanto, la profundidad del sustrato de 15 cm, mantiene temperaturas menores al del techo convencional, así como mayor estabilidad en las variaciones de temperaturas (ver figura 4.27).

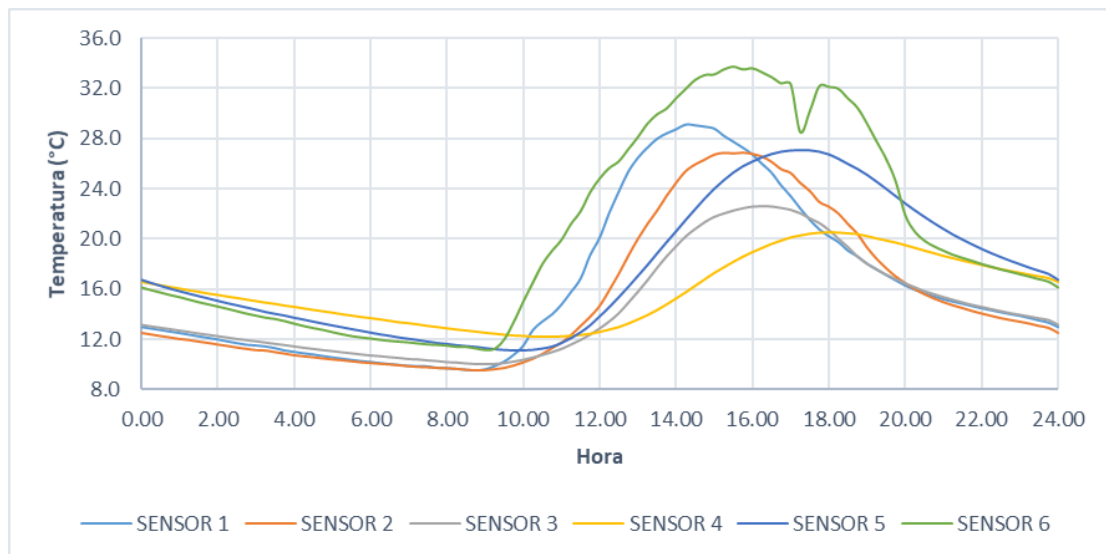


Figura 4.30. Valores promedio de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de febrero de 2021.

Marzo de 2021

En la figura 4.31, se observan los valores máximos de temperatura en los sensores, presentados en el mes de marzo. El sensor 6, muestra su temperatura máxima más baja es de 19.7°C a las 05:15 e incrementa a 56.4°C a las 15:00 horas, siendo un aumento de 36.7°C en 9 horas con 45 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura máxima más baja de 22.5°C a las 09:15 e incrementa a 36.1°C a las 17:00 horas, teniendo un aumento de 13.6°C en 7 horas con 45 minutos.

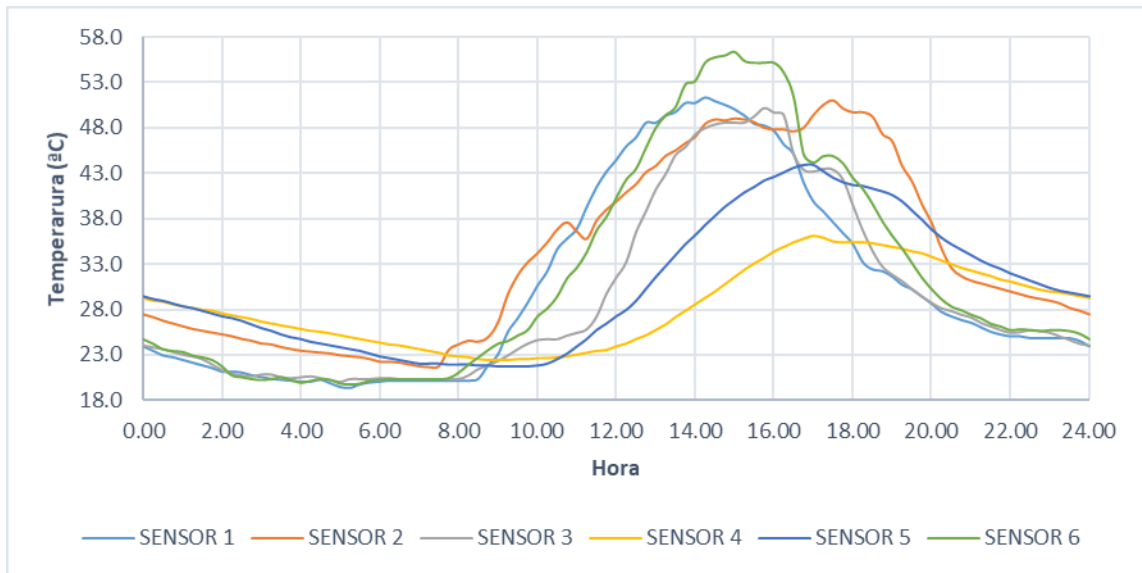


Figura 4.31. Valores máximos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de marzo de 2021.

En el mes de marzo, se observa en las temperaturas mínimas, un comportamiento similar al de febrero, manteniendo el PTVE 3 temperaturas mayores en el horario nocturno y temperaturas menores en el horario diurno, pero con diferencias más altas en el horario nocturno (ver figura 4.32). El sensor 6, su temperatura mínima más baja es de 10.0°C a las 08:30 e incrementa a 17.9°C a las 18:00 horas, siendo un aumento de 7.9°C en 9 horas con 30 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura mínima más baja de 9.9°C a las 10:30 e incrementa a 15.3°C a las 18:15 horas, teniendo un aumento de 5.4°C en 7 horas con 45 minutos.

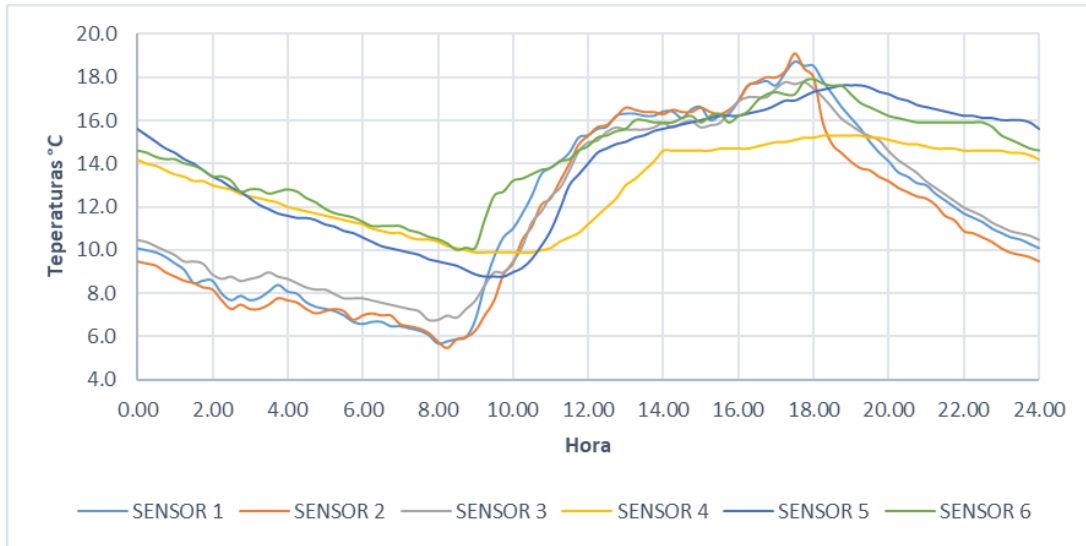


Figura 4.32. Valores mínimos de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de marzo de 2021.

En el caso de las temperaturas promedio, el sensor 6 presenta la temperatura promedio más baja de 14.1°C a las 7:30 e incrementa a 42.9°C a las 14:45 horas, siendo un aumento de 28.9°C en 7 horas con 15 minutos. Por el contrario, el sensor 4, presenta su temperatura promedio más baja de 17.1°C a las 10:30 e incrementa a 27.8°C a las 17:00 horas, teniendo un aumento de 10.8°C en 6 horas con 30 minutos. Por tanto, la profundidad del sustrato de 15 cm, mantiene temperaturas menores al del techo convencional, así como mayor estabilidad en las variaciones de temperaturas (ver figura 4.33).

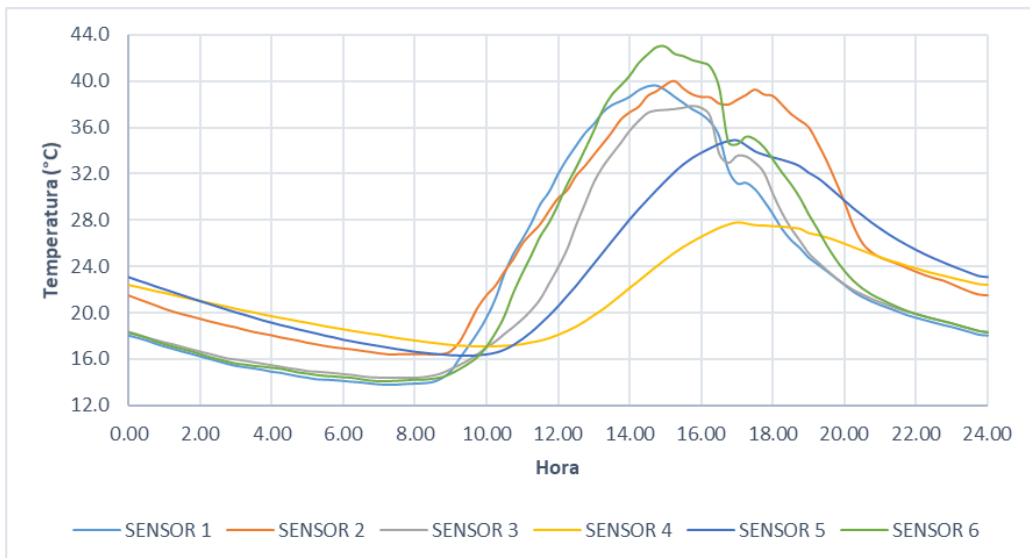


Figura 4.33. Valores promedio de temperatura presentados en los sensores de temperatura en los dispositivos en el mes de marzo de 2021.

4.1.5. RESUMEN ANUAL DE LOS RESULTADOS DE TEMPERATURA EN LOS PTVE

En los apartados anteriores fue posible observar cómo se comportan las temperaturas a cada profundidad de sustrato de los PTVE, así como en un techo convencional a lo largo de las 24 horas del día por cada mes dentro de un año. En este apartado se resumen estos resultados en el valor de temperatura máximo, mínimo y promedio presentado en cada mes de cada sensor de temperatura.

En la figura 4.34, se presentan en resumen los resultados de las temperaturas máximas presentadas en los sensores de temperatura instalados en los PTVE y en el techo convencional desde el mes de abril de 2020 al mes de marzo de 2021. Aquí es posible observar 2 sensores que destacan principalmente por una característica a lo largo del año, que es el sensor 4, que es el que se mantiene siempre con temperaturas menores a los demás sensores a lo largo del año. El otro destacable es el sensor 6, el cual es el que cada mes presenta temperaturas superiores a los demás en comparación con el resto, siendo el techo convencional el que tiene mayor temperatura a lo largo del año.

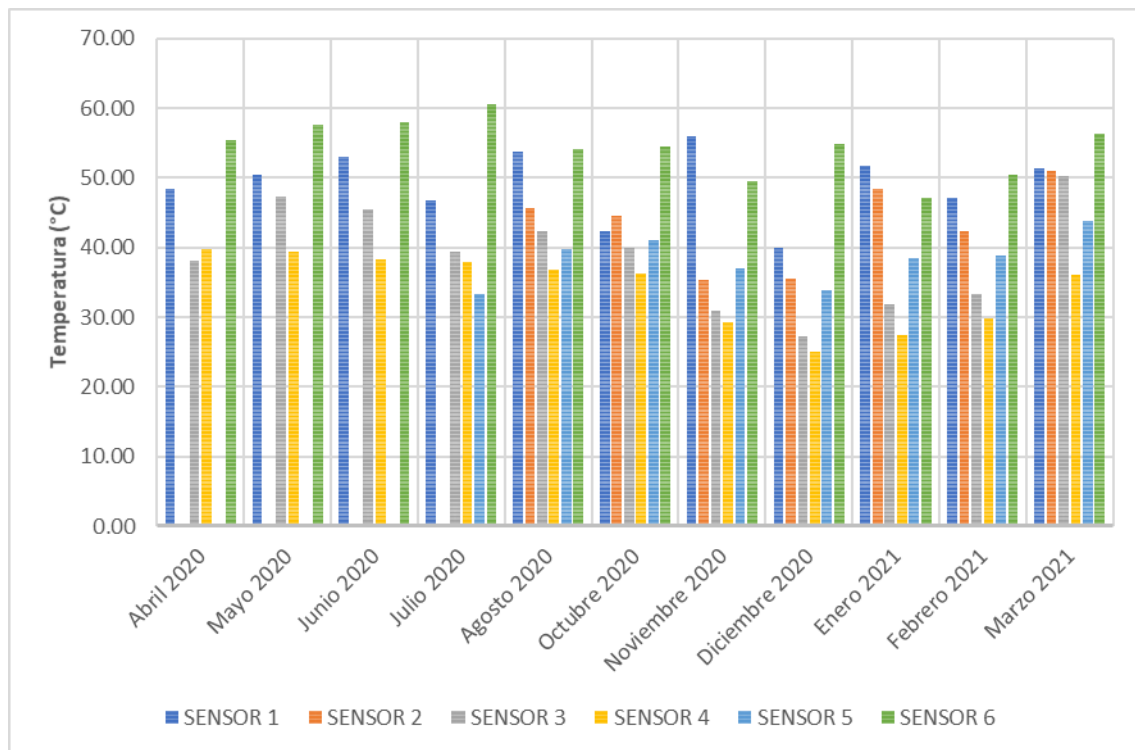


Figura 4.34. Valores de temperaturas máximas presentados en un período de un año en los PTVE.

En la tabla 4.1, se presentan los valores máximos de temperatura de los sensores que se presentaron en la figura 4.34. Siendo el mes de julio donde se presenta la temperatura más alta, siendo el sensor 6 llega a detectar una temperatura de 60.6 °C en el techo convencional.

Tabla 4.1. Valores de temperaturas máximas presentados en un período de un año en los PTVE.

Mes	SENSOR 1	SENSOR 2	SENSOR 3	SENSOR 4	SENSOR 5	SENSOR 6
Abril 2020	48.40		38.10	39.80		55.40
Mayo 2020	50.50		47.30	39.50		57.70
Junio 2020	53.00		45.40	38.30		58.00
Julio 2020	46.80	0.00	39.50	38.00	33.30	60.60
Agosto 2020	53.70	45.60	42.40	36.90	39.70	54.20
Octubre 2020	42.40	44.50	39.90	36.20	41.10	54.60
Noviembre 2020	56.00	35.30	30.90	29.20	37.00	49.50
Diciembre 2020	40.00	35.50	27.30	25.00	33.90	54.90
Enero 2021	51.70	48.40	31.90	27.40	38.50	47.10
Febrero 2021	47.10	42.40	33.30	29.80	38.90	50.50
Marzo 2021	51.40	51.00	50.20	36.10	43.90	56.40

En la figura 4.34, se presentan en resumen los resultados de las temperaturas mínimas presentadas en los sensores de temperatura instalados en los PTVE y en el techo convencional desde el mes de abril de 2020 al mes de marzo de 2021. De igual forma a las temperaturas máximas, el sensor 4 y 6, son los que destacan principalmente. Pero en caso contrario, observamos que el sensor 4, se mantiene con temperaturas mayores a la de los demás sensores; en cuanto al sensor 6, es el que tiene temperaturas inferiores a los demás. Esto porque generalmente cuando en el ambiente se presentan temperaturas bajas, los techos verdes tienden a mantener más cálida la superficie, que, por el contrario, el techo convencional, es más sensible a los cambios de temperatura en el ambiente.

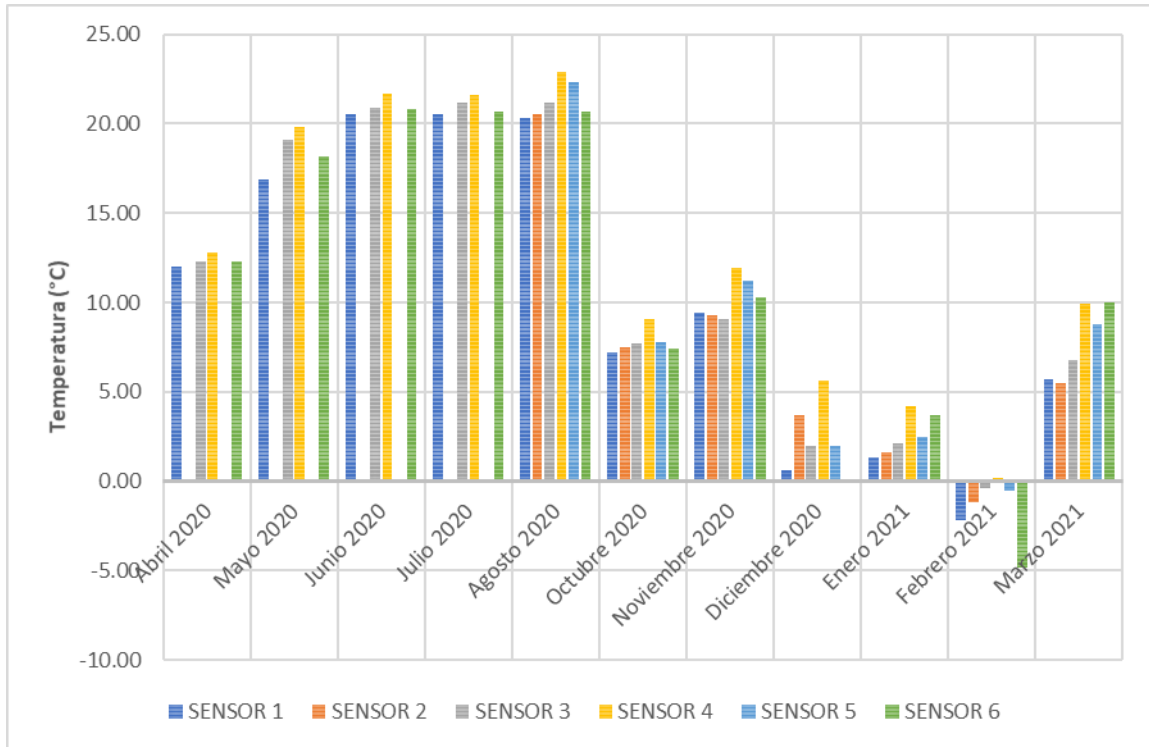


Figura 4.35. Valores de temperaturas mínimas presentados en un período de un año en los PTVE.

En la tabla 4.2, se presentan los valores mínimos de temperatura de los sensores que se presentaron en la figura 4.35. Siendo el mes de febrero donde se presenta la temperatura más baja, siendo el sensor 6 llega a detectar una temperatura de $-4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el techo convencional.

Tabla 4.2. Valores de temperaturas mínimas presentados en un período de un año en los PTVE.

Mes	SENSOR 1	SENSOR 2	SENSOR 3	SENSOR 4	SENSOR 5	SENSOR 6
Abril 2020	12.00		12.30	12.80		12.30
Mayo 2020	16.90		19.10	19.80		18.20
Junio 2020	20.50		20.90	21.70		20.80
Julio 2020	20.50	0.00	21.20	21.60		20.70
Agosto 2020	20.30	20.50	21.20	22.90	22.30	20.70
Octubre 2020	7.20	7.50	7.70	9.10	7.80	7.40
Noviembre 2020	9.40	9.30	9.10	11.90	11.20	10.30
Diciembre 2020	0.60	3.70	2.00	5.60	2.00	0.00
Enero 2021	1.30	1.60	2.10	4.20	2.50	3.70
Febrero 2021	-2.20	-1.20	-0.40	0.20	-0.50	-4.80
Marzo 2021	5.70	5.50	6.80	9.90	8.80	10.00

En la figura 4.36, se presentan en resumen los resultados de las temperaturas promedio presentadas en los sensores de temperatura instalados en los PTVE y en el techo convencional desde el mes de abril de 2020 al mes de marzo de 2021. De la misma manera que en las temperaturas máximas, los sensores 4 y 6, son los que presentan una característica particular al resto, donde el sensor 4 es el que mantiene temperaturas menores a los demás sensores durante todo el año (a excepción de la época de invierno, donde el sensor 2 y 3, tienen menores temperaturas promedio) y, el sensor 6, presenta temperaturas mayores en comparación con los demás sensores.

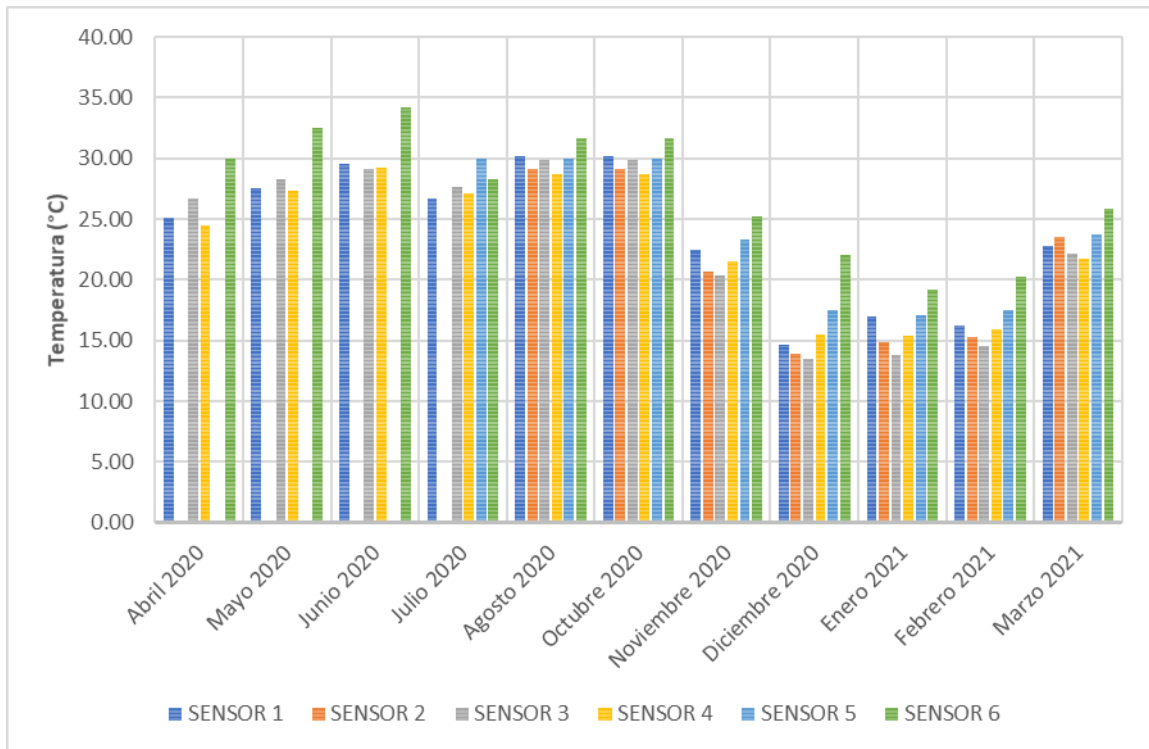


Figura 4.36. Valores de temperaturas mínimos presentados en un período de un año en los PTVE.

En la tabla 4.3, se presentan los valores promedio de temperatura de los sensores que se presentaron en la figura 4.35. En estas temperaturas, se puede observar que en promedio la temperatura del techo convencional tiene temperaturas mayores durante el año, en comparación con las que presentan los PTVE.

Tabla 4.3. Valores de temperaturas promedio presentados en un período de un año en los PTVE.

Mes	SENSOR 1	SENSOR 2	SENSOR 3	SENSOR 4	SENSOR 5	SENSOR 6
Abril 2020	25.07		26.68	24.46		29.99
Mayo 2020	27.54		28.27	27.36		32.52
Junio 2020	29.59		29.08	29.26		34.24
Julio 2020	26.71	0.00	27.64	27.13	29.98	28.26
Agosto 2020	30.18	29.17	29.81	28.67	29.97	31.61
Octubre 2020	30.18	29.17	29.81	28.67	29.97	31.61
Noviembre 2020	22.48	20.68	20.39	21.47	23.35	25.19
Diciembre 2020	14.64	13.89	13.49	15.53	17.47	22.04
Enero 2021	16.95	14.89	13.82	15.39	17.09	19.19
Febrero 2021	16.19	15.32	14.56	15.88	17.54	20.23
Marzo 2021	22.83	23.54	22.10	21.72	23.73	25.83

4.1.6. RESUMEN DE SENSORES CRÍTICOS

En los apartados anteriores se mencionaron principalmente los sensores que presentaron un comportamiento que difiere al resto. El primero es el sensor 4, que es el que se encuentra instalado en el PTVE 3, con un sustrato de 15 cm de profundidad. En este fue posible observar que en comparación del sensor 6, que se encuentra instalado en el techo convencional, mantiene temperaturas máximas menores durante todo el año. En la figura 4.37, se representan sus respectivas temperaturas por un gráfico de barras.

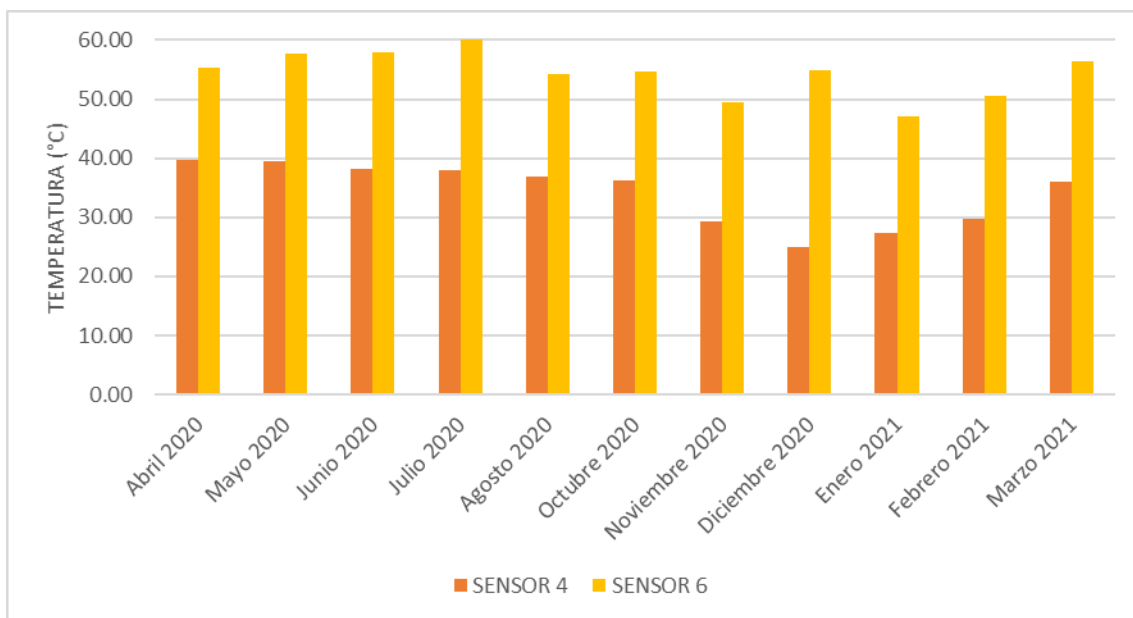


Figura 4.37. Temperaturas máximas anuales en los sensores 4 y 6.

En la tabla 4.4 se presentan los valores de las temperaturas máximas anuales de los sensores 4 y 6, así como en la cuarta columna se presenta la diferencia de temperatura entre ambos sensores representado por porcentaje. Se puede observar que el menor porcentaje de temperatura que se reduce es del 28.16% en el mes de abril de 2020, y la que mayor porcentaje se pudo disminuir fue en el mes de diciembre con 54.46%.

Tabla 4.4. Temperaturas máximas anuales en los sensores 4 y 6.

MES	SENSOR 4	SENSOR 6	DIFERENCIA (%)
Abril 2020	39.80	55.40	28.16%
Mayo 2020	39.50	57.70	31.54%
Junio 2020	38.30	58.00	33.97%
Julio 2020	38.00	60.60	37.29%
Agosto 2020	36.90	54.20	31.92%
Octubre 2020	36.20	54.60	33.70%
Noviembre 2020	29.20	49.50	41.01%
Diciembre 2020	25.00	54.90	54.46%
Enero 2021	27.40	47.10	41.83%
Febrero 2021	29.80	50.50	40.99%
Marzo 2021	36.10	56.40	35.99%

Por otro lado, en la figura 4.38, se presenta de manera gráfica las temperaturas mínimas anuales de los sensores 4 y 6, el cual es posible ver la forma en que el sensor 4 mantiene temperaturas más altas en comparación del sensor 6. Donde lo el mes de diciembre de 2020 y febrero de 2021, son los que presenta mejor desempeño.

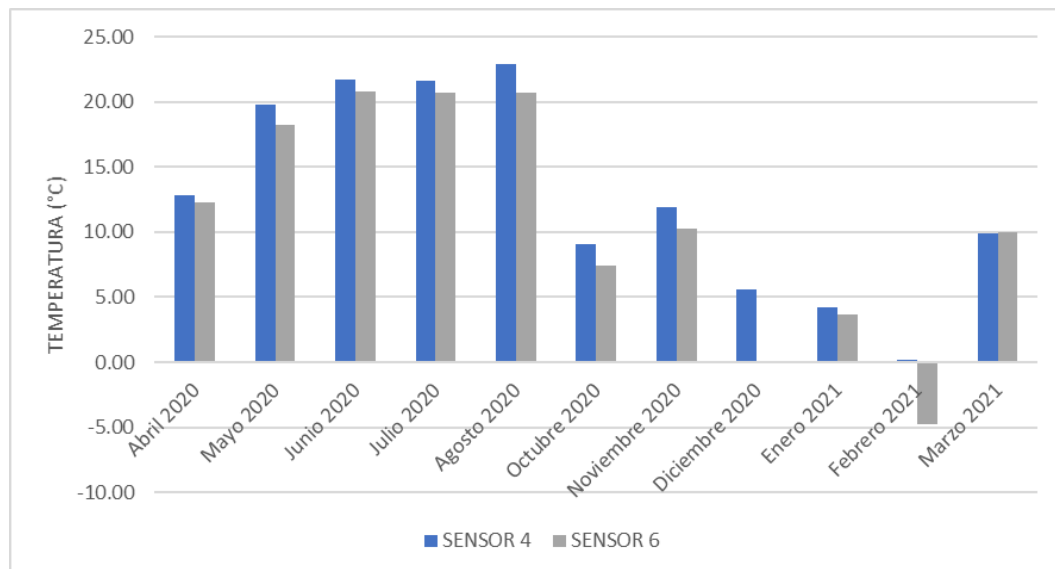


Figura 4.38. Temperaturas mínimas anuales en los sensores 4 y 6.

En la tabla 4.5. se presentan los valores de temperatura mínima de la figura 4.38, así como la diferencia en porcentaje de las temperaturas. Aquí es posible observar que el sensor 4 puede mantener al menos en un 1.00% más cálidas las temperaturas que en el sensor 6, pero cabe aclarar que estos porcentajes bajos se encuentran en los meses que no pertenecen a la época de invierno, ya que el momento en que se presentan estas temperaturas, son en los horarios nocturnos y este comportamiento es deseable. En cambio, si se observan los resultados de los meses de invierno, es posible observar que se mantienen temperaturas de al menos 13.51% más a altas y puede alcanzar hasta un 104.17% más cálidas, como se presenta en el mes de febrero.

Tabla 4.5. Temperaturas mínimas anuales en los sensores 4 y 6.

MES	SENSOR 4	SENSOR 6	DIFERENCIA (%)
Abril 2020	12.80	12.30	4.07%
Mayo 2020	19.80	18.20	8.79%
Junio 2020	21.70	20.80	4.33%
Julio 2020	21.60	20.70	4.35%
Agosto 2020	22.90	20.70	10.63%
Octubre 2020	9.10	7.40	22.97%
Noviembre 2020	11.90	10.30	15.53%
Diciembre 2020	5.60	0.00	+5.60 °C
Enero 2021	4.20	3.70	13.51%
Febrero 2021	0.20	-4.80	104.17%
Marzo 2021	9.90	10.00	1.00%

En el caso de las temperaturas promedio, en la figura 4.39, se aprecia por medio de un gráfico de barras, un comportamiento similar al de las temperaturas máximas del año. Donde en promedio, el sensor 6 tiene temperaturas altas y el sensor 4 puede regular estas temperaturas a niveles más bajo a lo largo del año.

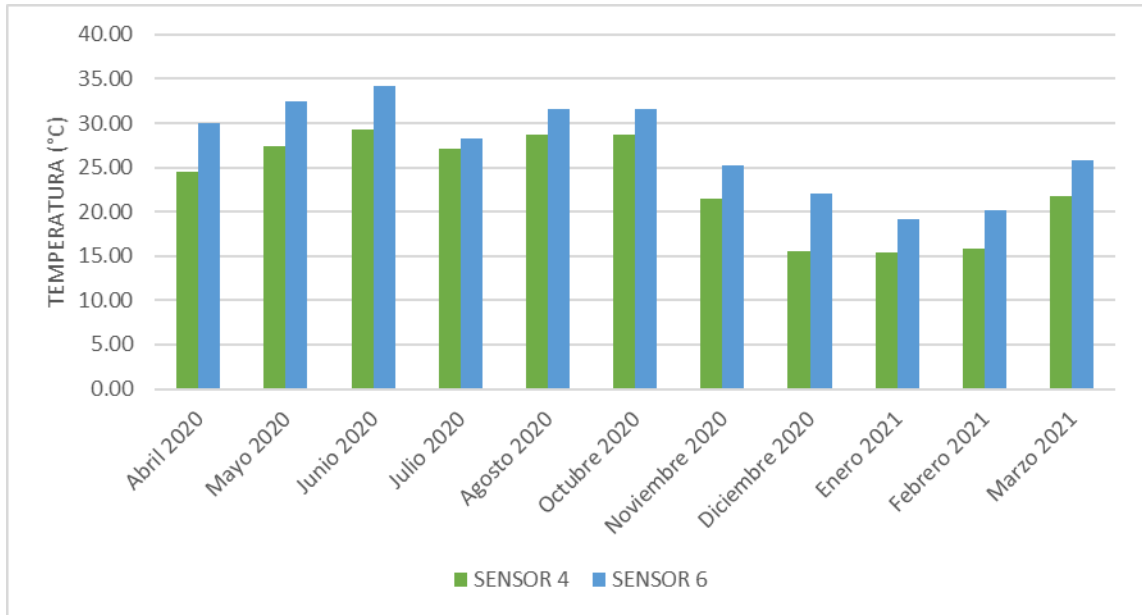


Figura 4.39. Temperaturas promedio anuales en los sensores 4 y 6.

En la tabla 4.6 se representan los valores por medio de una tabulación, donde es posible observar la magnitud en que el sensor 4 mantiene temperaturas más bajas en comparación del sensor 6, siendo representados en porcentaje en la columna 4. Aquí es posible observar que se puede disminuir desde un 3.98% las temperaturas promedio, hasta un 29.52%, en el mes de julio 2020 y diciembre 2020, respectivamente.

Tabla 4.6. Temperaturas promedio anuales en los sensores 4 y 6.

MES	SENSOR 4	SENSOR 6	DIFERENCIA (%)
Abril 2020	24.46	29.99	18.46%
Mayo 2020	27.36	32.52	15.86%
Junio 2020	29.26	34.24	14.55%
Julio 2020	27.13	28.26	3.98%
Agosto 2020	28.67	31.61	9.32%
Octubre 2020	28.67	31.61	9.32%
Noviembre 2020	21.47	25.19	14.78%
Diciembre 2020	15.53	22.04	29.52%
Enero 2021	15.39	19.19	19.80%
Febrero 2021	15.88	20.23	21.50%
Marzo 2021	21.72	25.83	15.91%

4.1.7. ANÁLISIS ANOVA

El análisis de varianza ANOVA prueba que la hipótesis que la media de dos o más poblaciones es igual. En el apartado 3.3.4, se planteó que la hipótesis nula establece que las medias de temperatura de los Prototipos de Techos Verdes Extensivos y el Techo Convencional son iguales, mientras que la hipótesis alternativa establece que son diferentes. Se mencionó que se aplicará para el sensor instalado con el mejor rendimiento térmico, que, por los resultados obtenidos son los del PTVE 3, comparándolo con los resultados del sensor del techo convencional (sensores 4 y 6).

Aplicando la metodología correspondiente y un nivel de significancia (alfa) de 0.05, fue posible obtener la relación de medias de temperaturas máximas de los sensores 4 y 6, mostrados por la tabla 4.7. A lo largo del año, se observa que no existe una relación significativa de las medias de ambos sensores, en el que los valores de F calculados son mayores a los valores críticos para F, en el que afirma que la relación en las medias es baja, así como la columna 3 “Probabilidad”, reafirma esto, en el que ningún valor se encuentra debajo de 0.05. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

Tabla 4.7. Análisis de varianza ANOVA de las temperaturas máximas de los sensores 4 y 6.

Mes	Fcalc	Probabilidad	Valor crítico para F
Abril 2020	74.4166	2.37E-15	3.8903
Mayo 2020	56.7432	1.90E-12	3.8903
Junio 2020	12.7122	4.59E-04	3.8903
Julio 2020	9.4784	2.38E-03	3.8903
Agosto 2020	42.9641	5.01E-10	3.8903
Octubre 2020	33.3931	3.00E-08	3.8903
Noviembre 2020	39.0599	2.60E-09	3.8903
Diciembre 2020	47.4882	7.73E-11	3.8903
Enero 2021	62.0800	2.39E-13	3.8903
Febrero 2021	51.5683	1.48E-11	3.8903
Marzo 2021	25.8774	8.62E-07	3.8903

En cuestión de la relación de las medias de las temperaturas mínimas en los sensores 4 y 6, se obtienen resultados similares a los de las temperaturas máximas. En la tabla 4.8, se muestran los resultados del análisis, en el que se observa que las medias de

ambos sensores no tienen relación en cuanto a la varianza, a excepción del mes de noviembre de 2020, que aquí se observa que las temperaturas mínimas del PTVE 3 y el techo convencional tienen un comportamiento similar. Esto se observa por la figura 4.20, y se afirma por lo mostrado en la tabla 4.8, donde el F calculado es menor al valor crítico para F, así como la probabilidad es mayor a 0.05. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

Tabla 4.8. Análisis de varianza ANOVA de las temperaturas mínimas de los sensores 4 y 6.

Mes	Fcalc	Probabilidad	Valor crítico para F
Abril 2020	18.8551	2.28E-05	3.8903
Mayo 2020	21.7669	5.76E-06	3.8903
Junio 2020	25.3538	1.10E-06	3.8903
Julio 2020	11.6578	7.80E-04	3.8903
Agosto 2020	11.9579	6.70E-04	3.8903
Octubre 2020	11.6119	7.98E-04	3.8903
Noviembre 2020	0.7317	0.39	3.8903
Diciembre 2020	47.4882	7.73E-11	3.8903
Enero 2021	1.8255	1.78E-01	3.8903
Febrero 2021	10.3030	1.56E-03	3.8903
Marzo 2021	21.6921	5.97E-06	3.8903

Por otro lado, en las medias de las temperaturas promedio en los sensores 4 y 6, se obtienen resultados similares a los de las temperaturas máximas. En la tabla 4.9, se muestran los resultados del análisis, en el que se observa que las medias de ambos sensores durante un año no tienen relación en cuanto a la varianza, donde el F calculado es mayor al valor crítico para F, así como la probabilidad es menor a 0.05. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

Tabla 4.9. Análisis de varianza ANOVA de las temperaturas promedio de los sensores 4 y 6.

Mes	Fcalc	Probabilidad	Valor crítico para F
Abril 2020	54.944	3.85E-12	3.890
Mayo 2020	27.617	3.91E-07	3.890
Junio 2020	22.060	5.02E-06	3.890
Julio 2020	3.6515	5.75E-02	3.890
Agosto 2020	20.726	9.39E-06	3.890
Octubre 2020	20.726	9.39E-06	3.890
Noviembre 2020	23.778	2.26E-06	3.890
Diciembre 2020	32.294	4.86E-08	3.890
Enero 2021	24.166	1.89E-06	3.890
Febrero 2021	26.933	5.33E-07	3.890
Marzo 2021	20.139	1.24E-05	3.890

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS A NIVEL MICRO ESCALA DE LOS TECHOS VERDES EXTENSIVOS

En esta investigación, el enfoque se centró en determinar el comportamiento térmico en la superficie de un edificio en un escenario donde el material que conforma la superficie es de materiales convencionales (concreto), y otro donde se implementan tecnologías techos verdes extensivos. El primer enfoque consistió en determinar la influencia de los techos verdes en las variaciones de temperatura a lo largo de un año a nivel micro escala.

Los resultados de la evaluación en las temperaturas máximas mensuales mostraron que los techos verdes extensivos a la profundidad de los sustratos de 5, 10 y 15 cm, mantienen la estabilidad de las variaciones de temperatura a lo largo del día, en comparación con el techo convencional. Asimismo, mantienen temperaturas más bajas en los horarios diurnos. Esto coincide con las gráficas de variaciones de temperatura de los autores M. Razzaghmanesh, Beecham, & Kazemi (2012), donde los techos verdes extensivos muestran un comportamiento similar en los horarios diurnos, a una profundidad del sustrato en los rangos de 10 y 20 centímetros, con una estabilidad de los cambios de temperatura, manteniendo valores de temperatura más bajos en comparación con una superficie de techo convencional.

Los prototipos de techos verdes extensivos, además de mostrar mejoramiento en la estabilidad de las variaciones de temperatura a lo largo del día, redujeron la temperatura en la superficie en las tres profundidades de sustrato, pero la de profundidad de 15 centímetros obtuvo mayor reducción de temperatura. Por la tabla 4.4, se observa una disminución máxima en el mes de diciembre de 29.9°C, reduciendo la temperatura en el techo en un 54.46%, esto tiene relación con lo investigado por Chagolla-Aranda et al. (2017), en Morelos, México, donde mencionan que, en el momento del día, cuando la temperatura del aire está en su máximo valor, la temperatura del techo verde en el interior del sustrato llega a ser menor que en el techo convencional en una medida de 20.5 °C, siendo valores similares a los de la presente investigación.

La estabilidad en las variaciones de temperatura y la reducción de temperatura en la superficie del techo, tienen relación con la transmisión de calor de la superficie al interior del edificio, donde de acuerdo con Yang et al. (2018), mencionan que esto conlleva a tener una temperatura más agradable, reduciendo temperaturas de hasta un 31%, que puede reducir el consumo de energía hasta en un 8%. Asimismo, Porcaro et al. (2019), determinaron que se al reducir las temperaturas de la superficie en un promedio de 16.3°C en época de verano, es posible reducir el flujo de calor en un 66% en época de verano.

Por otro lado, en los horarios nocturnos que es donde se presentan las temperaturas más bajas durante el día, se observa que los techos verdes extensivos mantienen temperaturas más cálidas en ese horario, siendo posible observarlo en las figuras del apartado 4.1. En los resultados obtenidos por Mostafa Razzaghmanesh et al. (2016), observamos este mismo comportamiento en las gráficas diarias, tanto en verano como en invierno. Por lo tanto, en invierno, se podría esperar que cuando se presenten temperaturas más bajas, se presente el mismo fenómeno que el horario nocturno. Esto se afirma con las gráficas de temperatura mínimas, donde se observa por la tabla 4.5, que, en febrero, fue posible mantener hasta en un 104.17% temperaturas más cálidas en el mes de febrero. Esto coincide con los resultados obtenidos por Porcaro et al. (2019), que por mantener temperaturas más cálidas, conllevó a disminuir las pérdidas de energía con un valor de -9.1 KWh/m², siendo un 65.3% en comparación con un techo convencional.

Las variaciones de temperatura de los techos verdes extensivos en comparación con los techos convencionales, mostraron una mejoría en cuanto a su estabilidad, y su capacidad de mantener temperaturas más bajas en épocas de verano y temperaturas más cálidas en épocas de invierno. Esto se puede observar por el análisis de varianza por el método ANOVA en el apartado 4.1.7, donde se observa que las medias no tienen relación alguna y difieren en gran medida los resultados de ambos tipos de techos, rechazando la hipótesis nula y aceptando la hipótesis alternativa planteada en el apartado 3.3.4.

4.3. RESULTADOS DE MODELACIÓN DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS Y DE TECHO CONVENCIONAL A NIVEL MACRO ESCALA POR EL PROGRAMA ENVI-MET

En el presente apartado, se muestran resultados de la modelación en el programa ENVI-MET, incluyendo el potencial de temperatura de aire, la sensibilidad en la transferencia de calor en los edificios y la temperatura superficial presentadas a las 04:00 y las 16:00 horas en la época de verano (08 de junio de 2019) y a las 07:00 y 16:00 en la época de invierno (17 de enero de 2018). Los resultados mostrados son en cuestión de un escenario donde el sitio de investigación cuenta con el 100% de techos convencionales y otro escenario donde se tiene el 50% de techos verdes extensivos.

4.3.1. RESULTADOS DE MODELACIÓN EN ÉPOCA DE VERANO (08 DE JUNIO DE 2019)

POTENCIAL DE TEMPERATURA DE AIRE

Este parámetro es en referencia a la temperatura del aire en la época de verano con la fecha de 08 de junio de 2019 presentado en el área en cuestión, representado por una gama de colores para ilustrar los valores de temperatura en la zona de investigación.

En la figura 4.40 se presentan los resultados obtenidos del potencial de temperatura del aire por medio de la modelación en el programa ENVI-met. Los resultados se presentan a la 04:00 horas en el escenario en el que el área de investigación se encuentra conformada por el 100% de techos convencionales. Aquí se muestra que la temperatura mínima es de 26.97°C y la máxima de 27.43°C. Siendo esto presentado a la hora de menor temperatura durante las 24 horas del presente día.

Con una representación gráfica de la temperatura del aire, se observa la forma en la que interactúa la temperatura del aire en una zona residencial. En la figura 4.40, se observa que las temperaturas más altas se encuentran en la zona este, ya que el viento proviene de una dirección de 90° (ver tabla 3.4) en el área modelada, y conforme el aire

pasa a través de los edificios se disminuye la temperatura. En este caso la única influencia son los edificios con materiales convencionales.

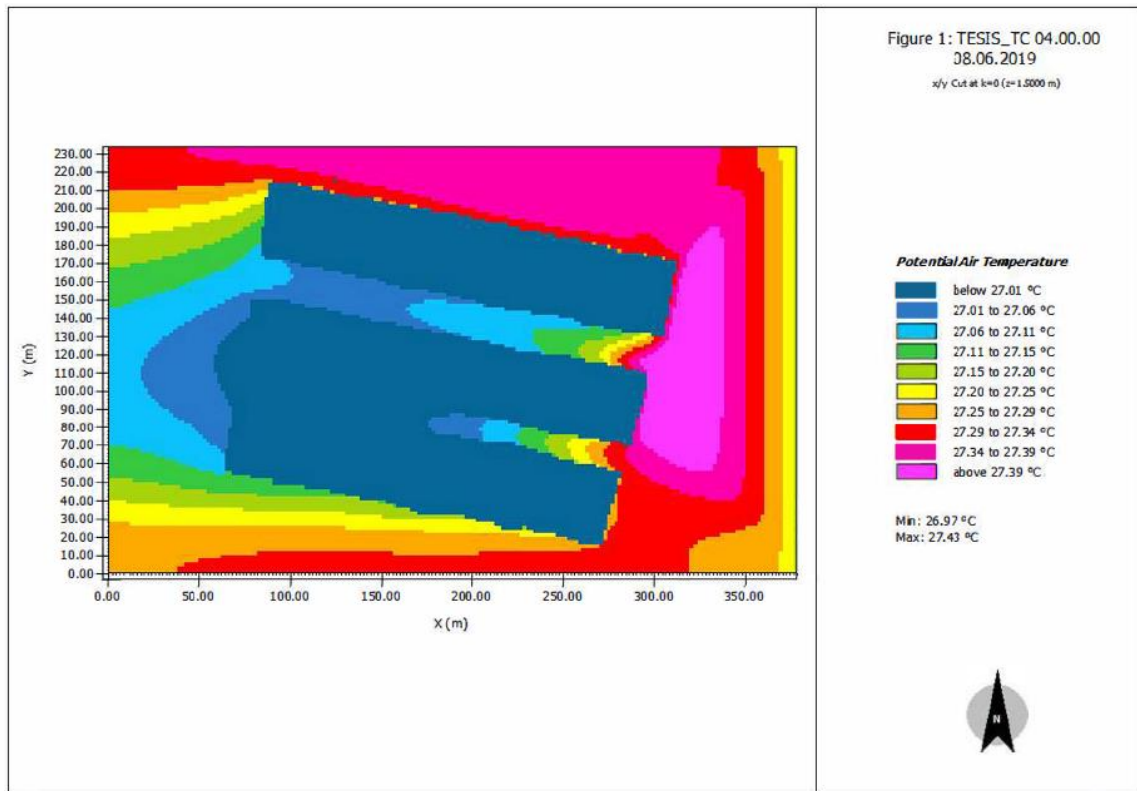


Figura 4.40. Potencial de temperatura del aire en escenario de Techo Convencional en la fecha de 08 de junio de 2019 a las 04:00 horas.

Por otro lado, en la figura 4.41 se presentan los resultados obtenidos del potencial de temperatura del aire en el escenario con la implementación del 50% de techos verdes extensivos en el área en cuestión. La modelación se realizó con las mismas condiciones a los del techo convencional a las 04:00 horas. En los resultados se muestra que la temperatura mínima es de 26.50°C y la máxima de 27.90°C. En comparación con el techo convencional, se muestra una disminución de 0.47°C en el potencial de temperatura del aire.

De la misma manera que con el techo convencional, las temperaturas más altas se presentan en la zona este, y en la zona oeste se presentan menores valores. A dife-

rencia del caso con techo convencionales, la vegetación en los techos verdes es que disminuye la velocidad del viento entre las cuadras del área en cuestión, representándose por la figura 4.41.

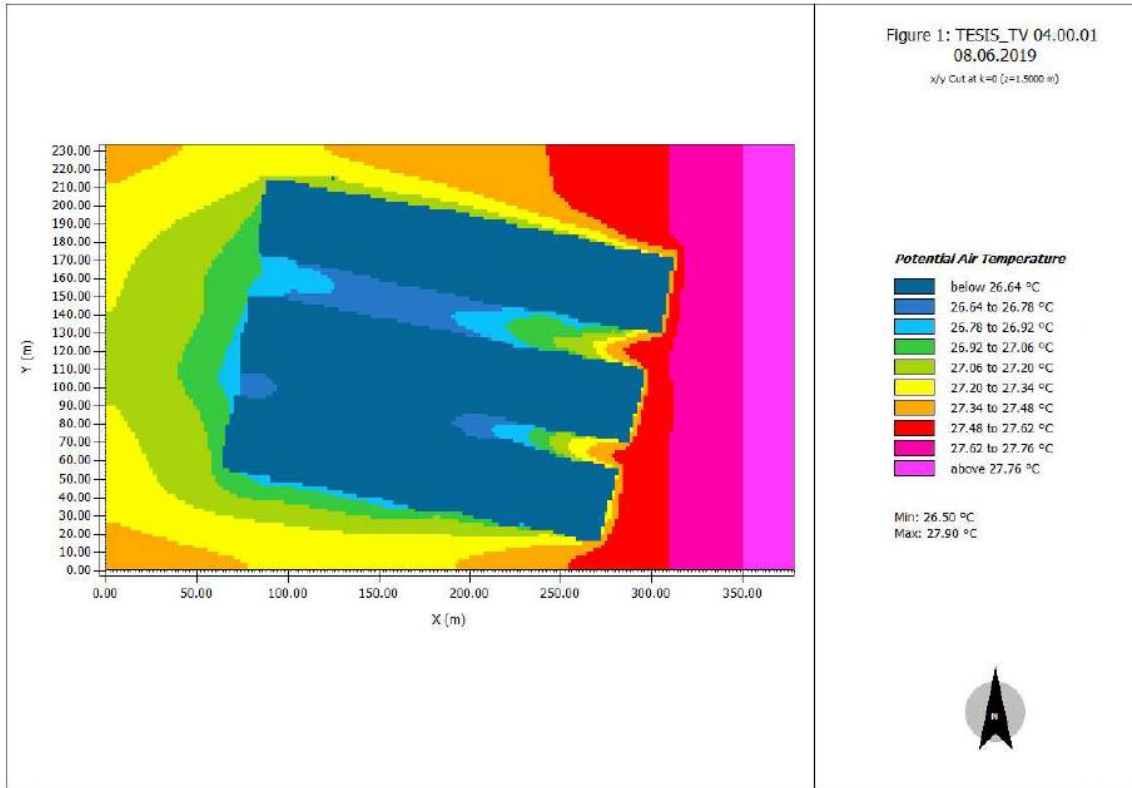


Figura 4.41. Potencial de temperatura del aire en escenario de Techo Verde en la fecha de 08 de junio de 2019 a las 04:00 horas.

En la figura 4.42 se presentan los resultados obtenidos del potencial de temperatura del aire por medio de la modelación en el programa ENVI-met. Los resultados se presentan a la 16:00 horas del día 08 de junio de 2019 en el escenario en el que el área de investigación se encuentra conformada por el 100% de techos convencionales. Aquí se muestra que la temperatura mínima es de 42.80°C y la máxima de 45.96°C. Siendo esto presentado a la hora de mayor temperatura durante las 24 horas del presente día.

En el horario de las 16:00 horas que es donde se presenta la temperatura más alta, se observa el mismo efecto de las mayores temperaturas en dirección oeste y las menores en dirección este. También, en el caso de ser horario diurno, la influencia de la

sombra tiene efecto en la temperatura, ya que en su lado oeste mantienen temperaturas menores a las de la dirección este.

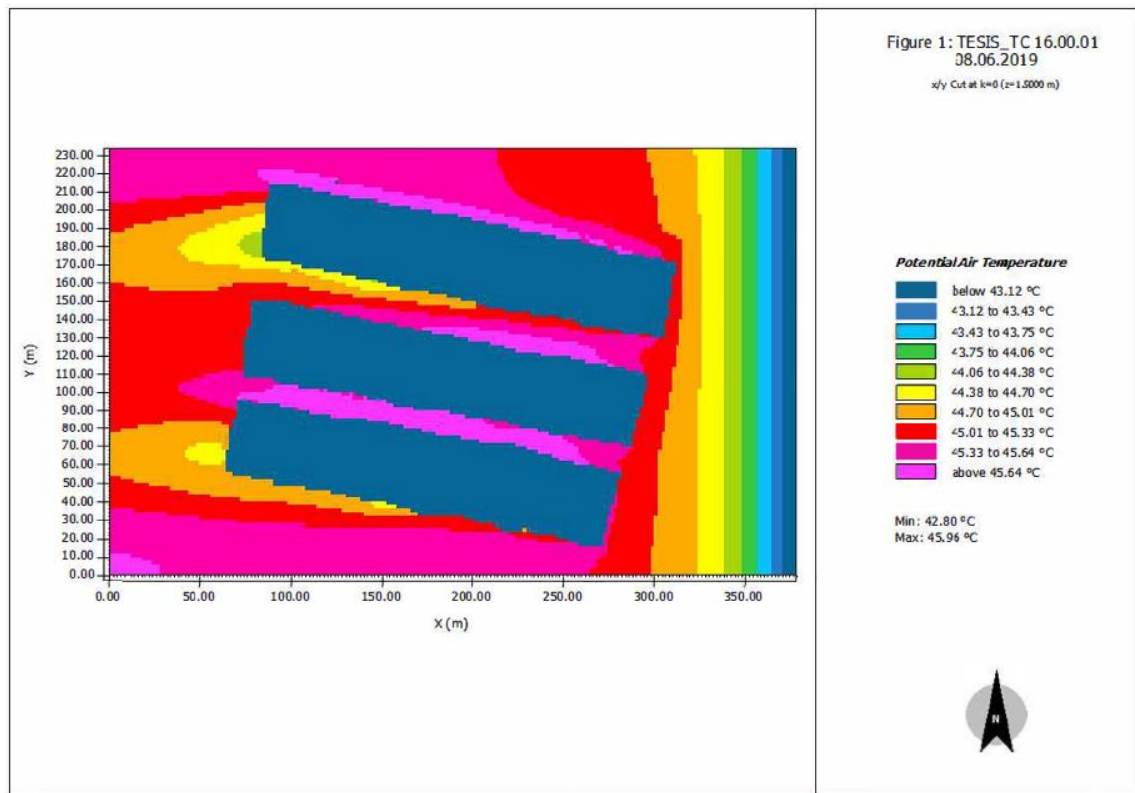


Figura 4.42. Potencial de temperatura del aire en escenario de Techo Convencional en la fecha de 08 de junio de 2019 a las 16:00 horas.

Por otro lado, en la figura 4.43 se presentan los resultados obtenidos del potencial de temperatura del aire en el escenario con la implementación del 50% de techos verdes extensivos en el área en cuestión. La modelación se realizó con las mismas condiciones a los del techo convencional a las 16:00 horas. En los resultados se muestra que la temperatura mínima es de 42.80°C y la máxima de 45.49°C. En comparación con el techo convencional, se muestra una disminución de 0.47°C en el potencial de temperatura del aire máximas.

La temperatura del aire con techos verdes tuvo un comportamiento similar al del techo convencional, con la diferencia en que la cantidad de calor se acumula alrededor

de los edificios en los techos convencionales, en cambio, con los techos verdes se mejora este efecto.

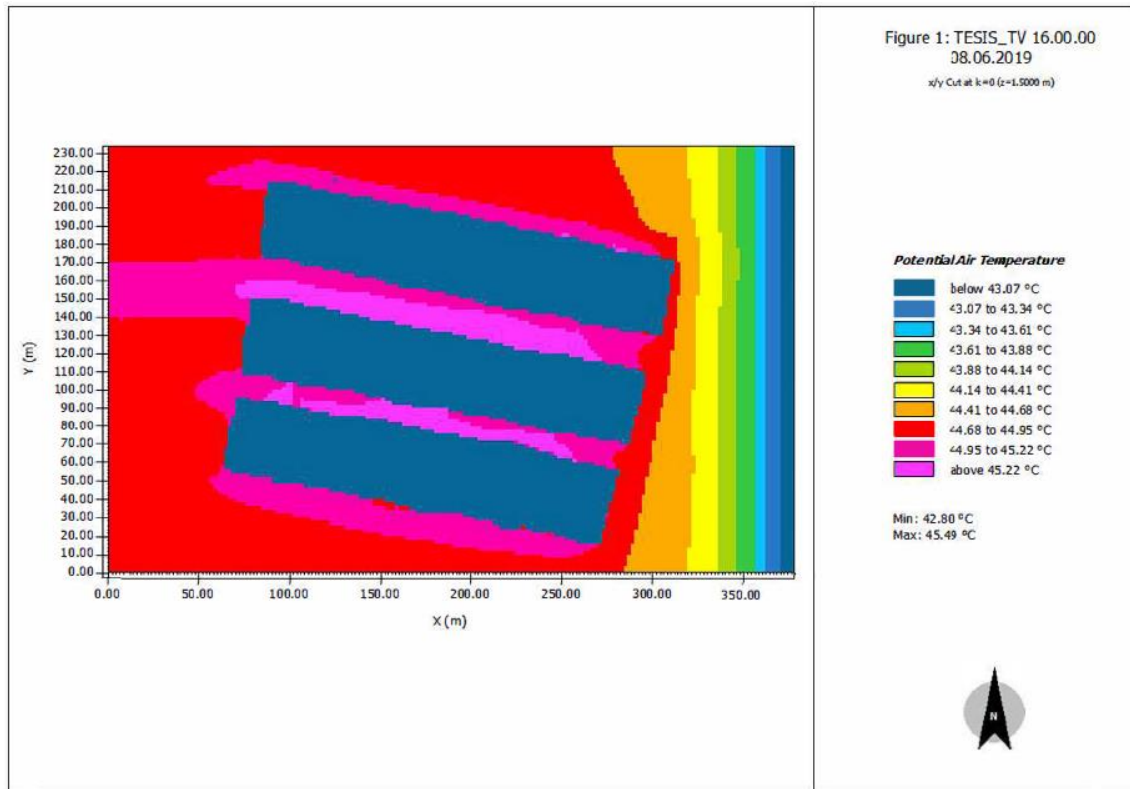


Figura 4.43. Potencial de temperatura del aire en escenario de Techo Verde en la fecha de 08 de junio de 2019 a las 16:00 horas.

SENSIBILIDAD EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Los resultados de la sensibilidad en la transferencia de calor, representa la magnitud de la relación con los cambios de temperatura de la superficie expresada en W/m^2 . La figura 4.44 muestra los resultados obtenidos la sensibilidad de transferencia de calor por medio de la modelación en el programa ENVI-met. Los resultados se presentan a la 07:00 horas en el escenario en el que el área de investigación se encuentra conformada por el 100% de techos convencionales. Aquí se muestra que la sensibilidad en la transferencia de calor mínima es de $0 W/m^2$ y la máxima de $17.74 W/m^2$. Siendo esto presentado a la hora de menor temperatura durante las 24 horas del presente día.

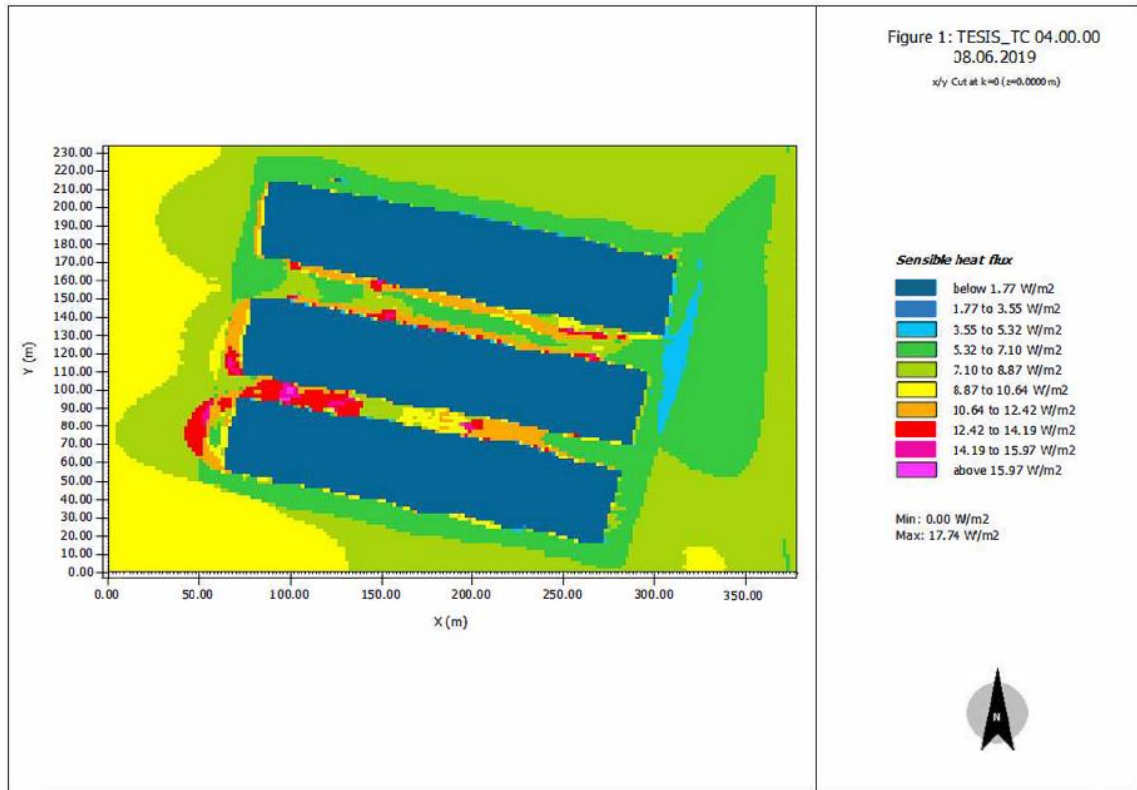


Figura 4.44. Sensibilidad a la transferencia de calor en escenario de Techo Convencional en la fecha de 08 de junio de 2019 a las 04:00 horas.

Por otro lado, en la figura 4.45 se presentan los resultados obtenidos de la sensibilidad en la transferencia de calor en el escenario con la implementación del 50% de techos verdes extensivos en el área en cuestión. La modelación se realizó con las mismas condiciones a los del techo convencional a las 07:00 horas. En los resultados se muestra que la sensibilidad en la transferencia de calor mínima es de 0.25 W/m² y la máxima de 0 W/m². En comparación con el techo convencional, que en la madrugada el techo verde actúa como liberador de calor hacia la atmosfera, en lugar de transmitirlo hacia el interior del edificio.

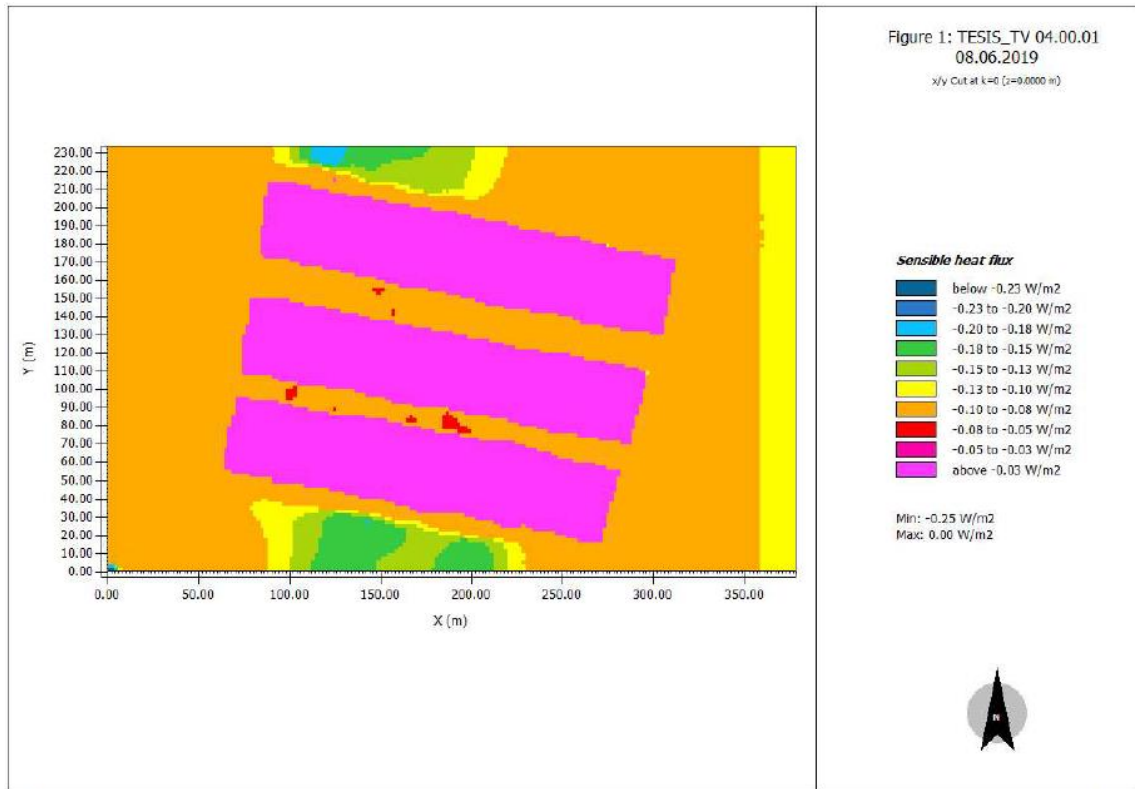


Figura 4.45. Sensibilidad a la transferencia de calor en escenario de Techo Verde en la fecha de 08 de junio de 2019 a las 04:00 horas.

En la figura 4.46 se presentan los resultados obtenidos de la sensibilidad de transferencia de calor por medio de la modelación en el programa ENVI-met. Los resultados se presentan a la 16:00 horas en el escenario en el que el área de investigación se encuentra conformada por el 100% de techos convencionales. Aquí se muestra que la sensibilidad en la transferencia de calor mínima es de 0 W/m² y la máxima de 439.25 W/m². Siendo esto presentado a la hora de mayor temperatura durante las 24 horas del presente día.

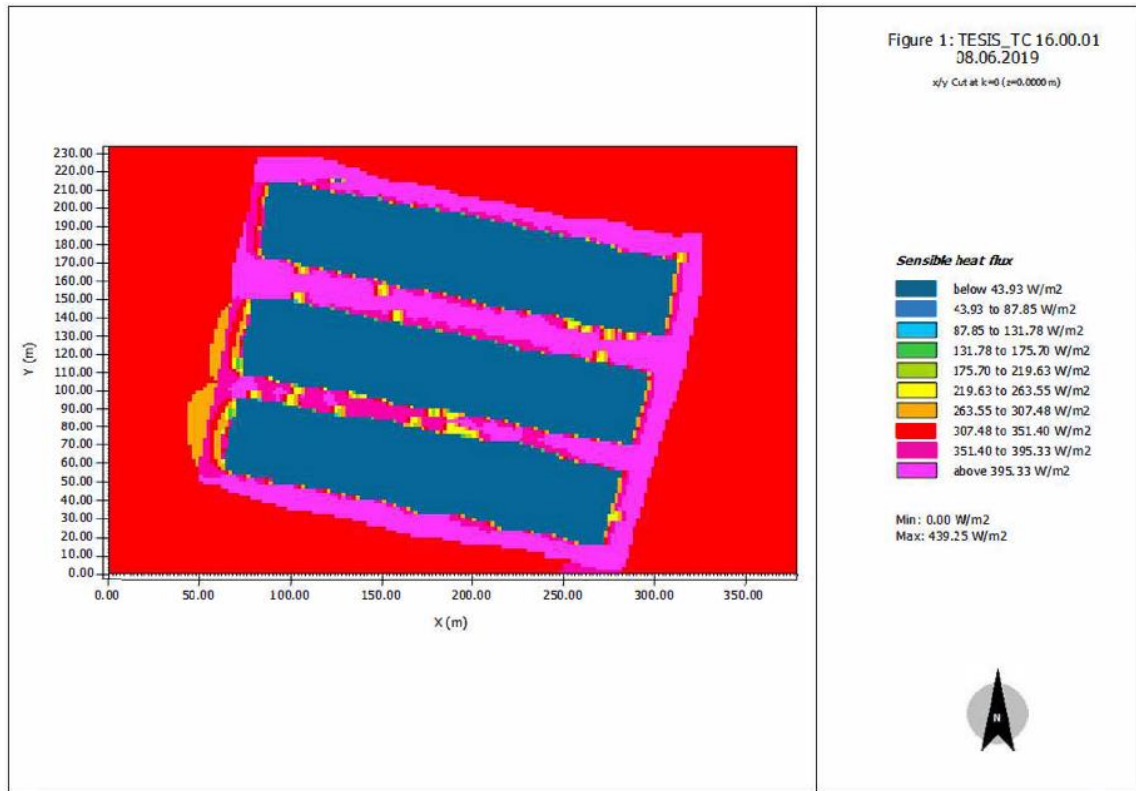


Figura 4.46. Sensibilidad a la transferencia de calor en escenario de Techo Convencional en la fecha de 08 de junio de 2019 a las 16:00 horas.

Por otro lado, en la figura 4.47 se presentan los resultados obtenidos de la sensibilidad de transferencia de calor en el escenario con la implementación del 50% de techos verdes extensivos en el área en cuestión. La modelación se realizó con las mismas condiciones a los del techo convencional a las 16:00 horas. En los resultados se muestra que la sensibilidad en la transferencia de calor mínima es de -10.33 W/m^2 y la máxima de 379.89 W/m^2 . En comparación con el techo convencional, se muestra una disminución de 13.33 W/m^2 y 59.36 W/m^2 en la sensibilidad de transferencia de calor mínimas y máximas, respectivamente.

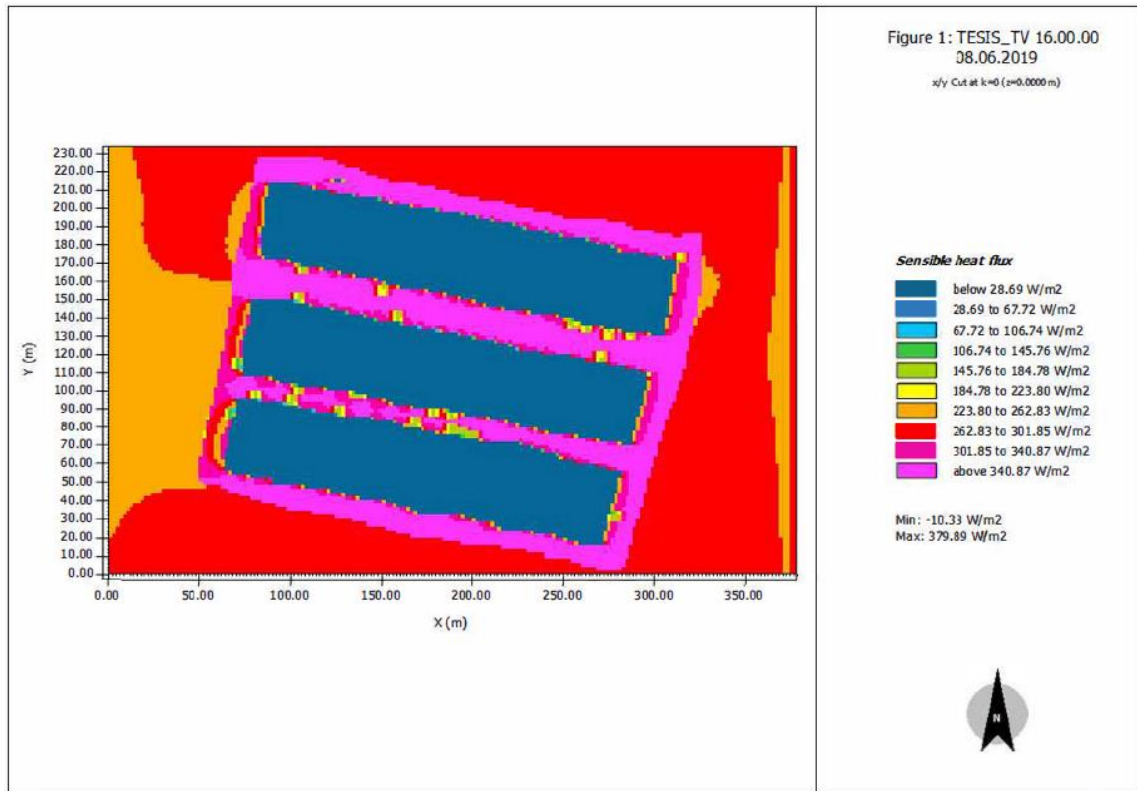


Figura 4.47. Sensibilidad a la transferencia de calor en escenario de Techo Verde en la fecha de 08 de junio de 2019 a las 16:00 horas.

TEMPERATURA SUPERFICIAL

Este parámetro es en referencia a la temperatura superficial en la época de verano con la fecha de 08 de junio de 2019 presentado en el área en cuestión, representado por una gama de colores para ilustrar los valores de temperatura en la zona de investigación.

En la figura 4.48 se presentan los resultados obtenidos de la temperatura superficial por medio de la modelación en el programa ENVI-met. Los resultados se presentan a la 04:00 horas en el escenario en el que el área de investigación se encuentra conformada por el 100% de techos convencionales. Aquí se muestra que la temperatura mínima es de 19.85°C y la máxima de 28.98°C. Siendo esto presentado a la hora de menor temperatura durante las 24 horas del presente día.

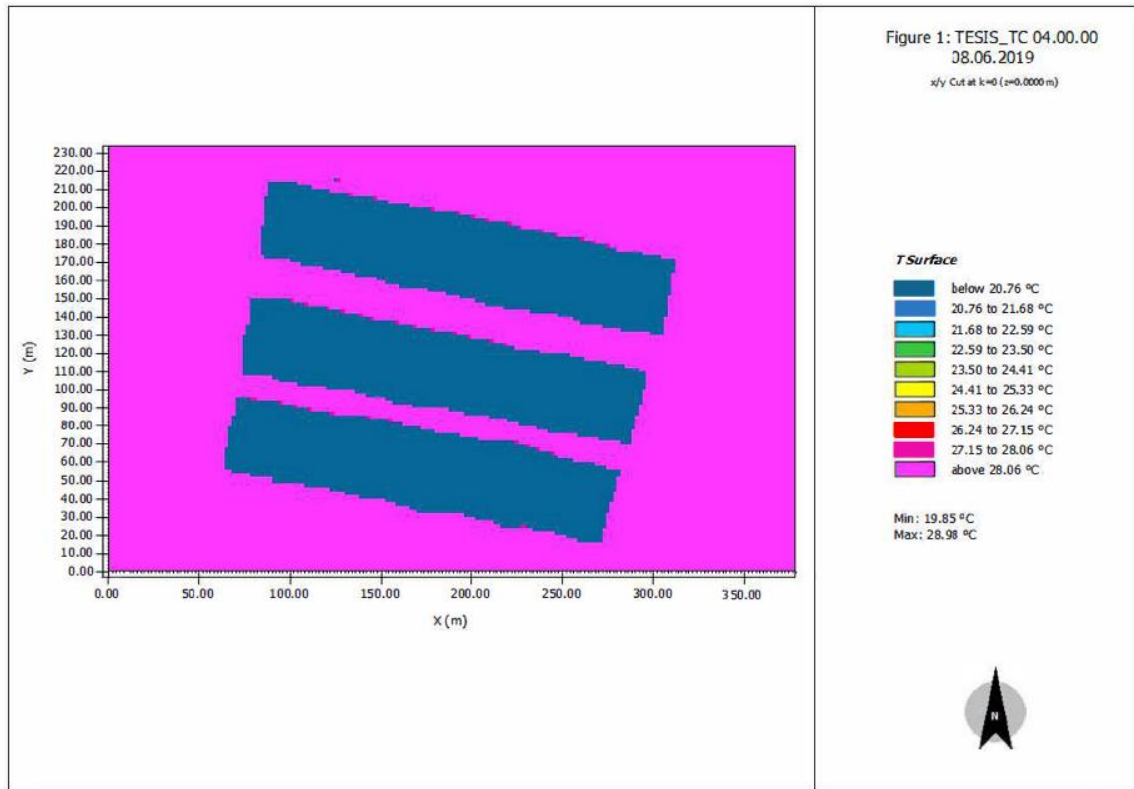


Figura 4.48. Temperatura de la superficie en escenario de Techo Convencional en la fecha de 08 de junio de 2019 a las 04:00 horas.

Por otro lado, en la figura 4.49 se presentan los resultados obtenidos de la temperatura superficial en el escenario con la implementación del 50% de techos verdes extensivos en el área en cuestión. La modelación se realizó con las mismas condiciones a los del techo convencional a las 04:00 horas. En los resultados se muestra que la temperatura mínima es de 19.85°C y la máxima de 22.44°C. En comparación con el techo convencional, se muestra una disminución de 6.54°C en la temperatura superficial.

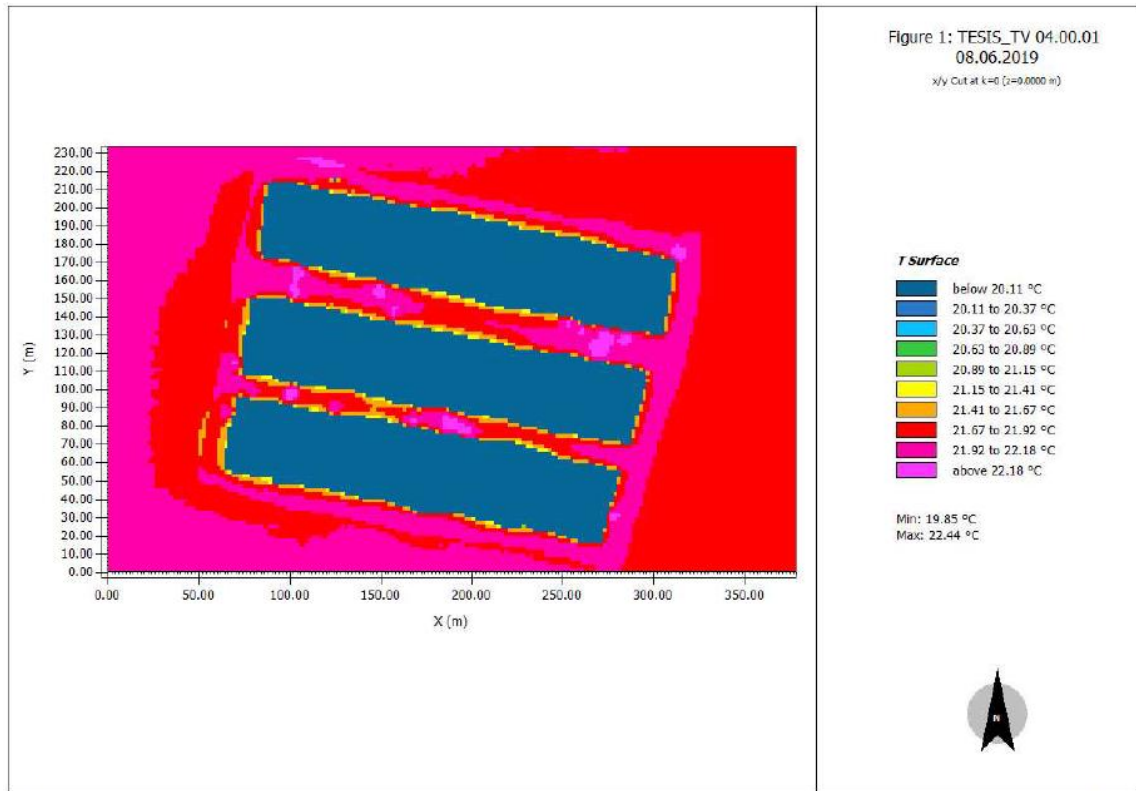


Figura 4.49. Temperatura de la superficie en escenario de Techo Verde en la fecha de 08 de junio de 2019 a las 04:00 horas.

En la figura 4.50 se presentan los resultados obtenidos de la temperatura superficial por medio de la modelación en el programa ENVI-met. Los resultados se presentan a la 16:00 horas en el escenario en el que el área de investigación se encuentra conformada por el 100% de techos convencionales. Aquí se muestra que la temperatura mínima es de 19.85°C y la máxima de 62.60°C. Siendo esto presentado a la hora de menor temperatura durante las 24 horas del presente día.

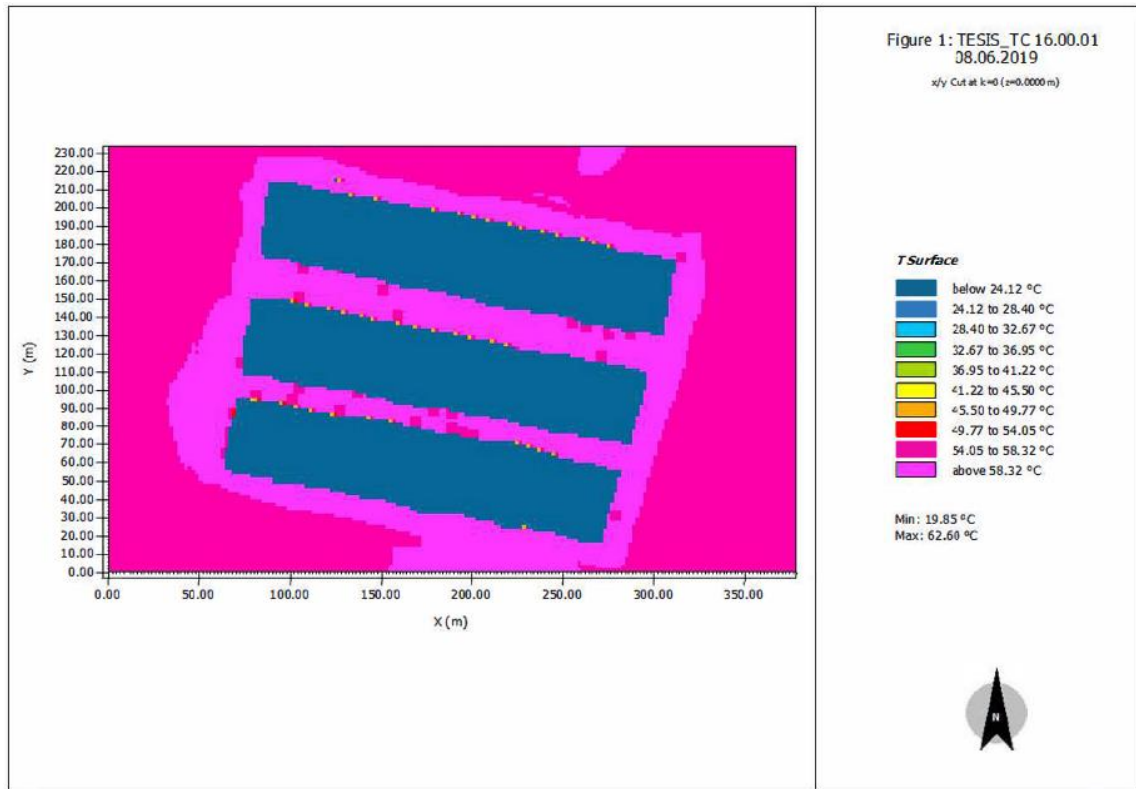


Figura 4.50. Temperatura de la superficie en escenario de Techo Convencional en la fecha de 08 de junio de 2019 a las 16:00 horas.

Por otro lado, en la figura 4.51 se presentan los resultados obtenidos de la temperatura superficial en el escenario con la implementación del 50% de techos verdes extensivos en el área en cuestión. La modelación se realizó con las mismas condiciones a los del techo convencional a las 16:00 horas. En los resultados se muestra que la temperatura mínima es de 19.85°C y la máxima de 60.30°C. En comparación con el techo convencional, se muestra una disminución de 2.30°C en la temperatura superficial.

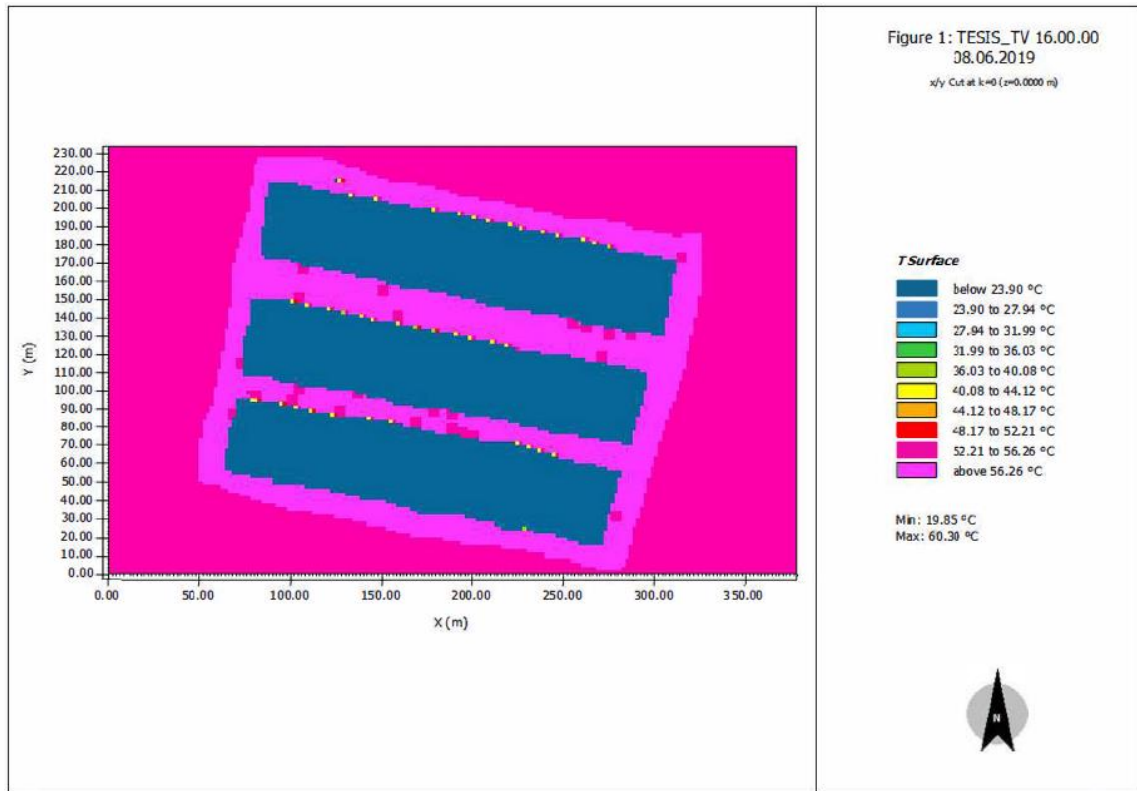


Figura 4.51. Temperatura de la superficie en escenario de Techo Verde en la fecha de 08 de junio de 2019 a las 16:00 horas.

4.3.1. RESULTADOS DE MODELACIÓN EN ÉPOCA DE INVIERNO (17 DE ENERO DE 2018)

POTENCIAL DE TEMPERATURA DE AIRE

Este parámetro es en referencia a la temperatura del aire en la época de invierno con la fecha de 17 de enero de 2018 presentado en el área en cuestión, representado por una gama de colores para ilustrar los valores de temperatura en la zona de investigación.

En la figura 4.52 se presentan los resultados obtenidos del potencial de temperatura del aire por medio de la modelación en el programa ENVI-met. Los resultados se presentan a la 07:00 horas en el escenario en el que el área de investigación se encuentra conformada por el 100% de techos convencionales. Aquí se muestra que la temperatura mínima es de -2.10°C y la máxima de -0.93°C . Siendo esto presentado a la hora de menor temperatura durante las 24 horas del presente día.

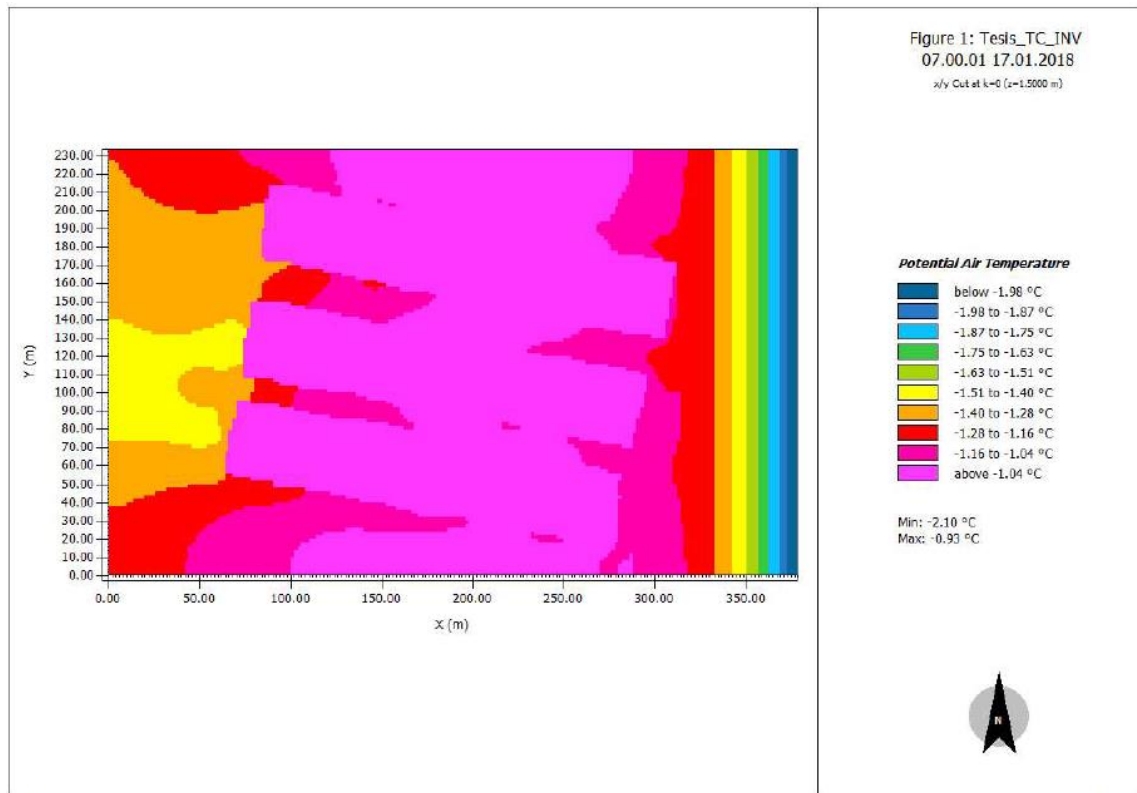


Figura 4.52. Temperatura de la superficie en escenario de Techo Convencional en la fecha de 17 de enero de 2018 a las 07:00 horas.

Por otro lado, en la figura 4.53 se presentan los resultados obtenidos del potencial de temperatura del aire en el escenario con la implementación del 50% de techos verdes extensivos en el área en cuestión. La modelación se realizó con las mismas condiciones a los del techo convencional a las 07:00 horas. En los resultados se muestra que la temperatura mínima es de -2.10°C y la máxima de -0.95°C . En comparación con el techo convencional, se muestra que el potencial de temperatura de aire bajó 0.02°C .

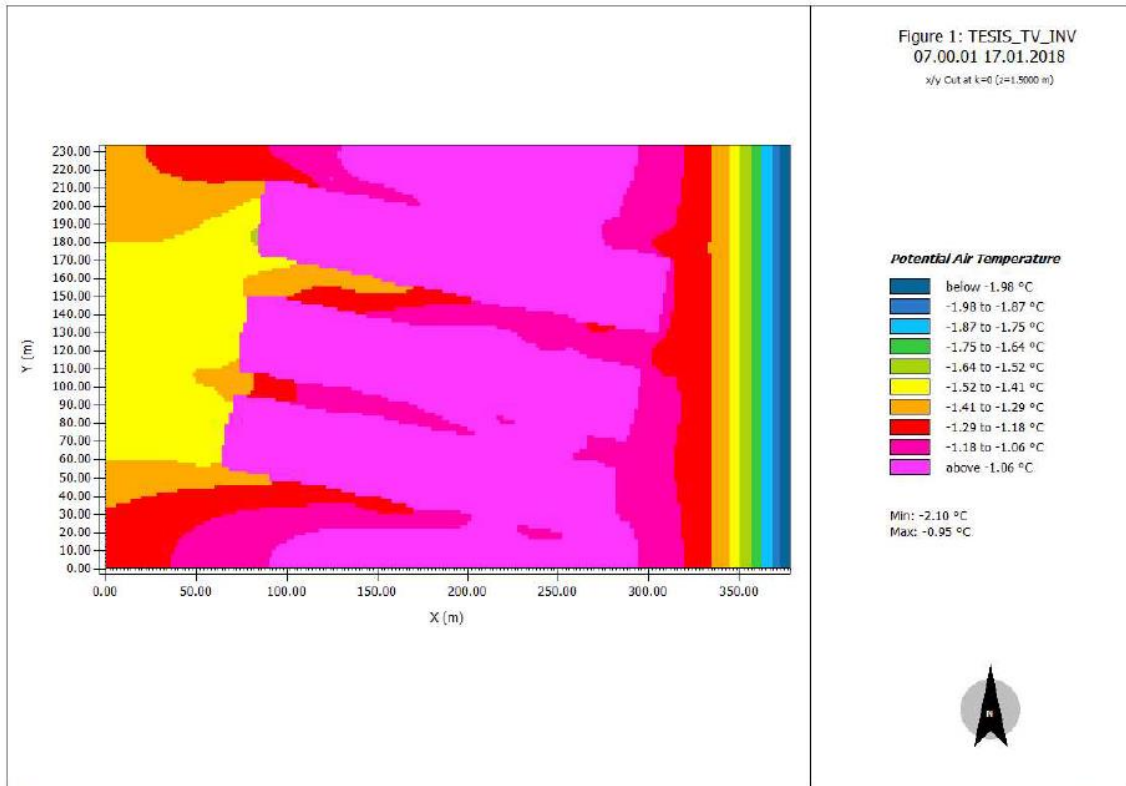


Figura 4.53. Temperatura de la superficie en escenario de Techo Verde en la fecha de 17 de enero de 2018 a las 07:00 horas.

En la figura 4.53 se presentan los resultados obtenidos del potencial de temperatura del aire por medio de la modelación en el programa ENVI-met. Los resultados se presentan a la 16:00 horas del día 17 de enero de 2018 en el escenario en el que el área de investigación se encuentra conformada por el 100% de techos convencionales. Aquí se muestra que la temperatura mínima es de 2.50°C y la máxima de 5.76°C. Siendo esto presentado a la hora de mayor temperatura durante las 24 horas del presente día.

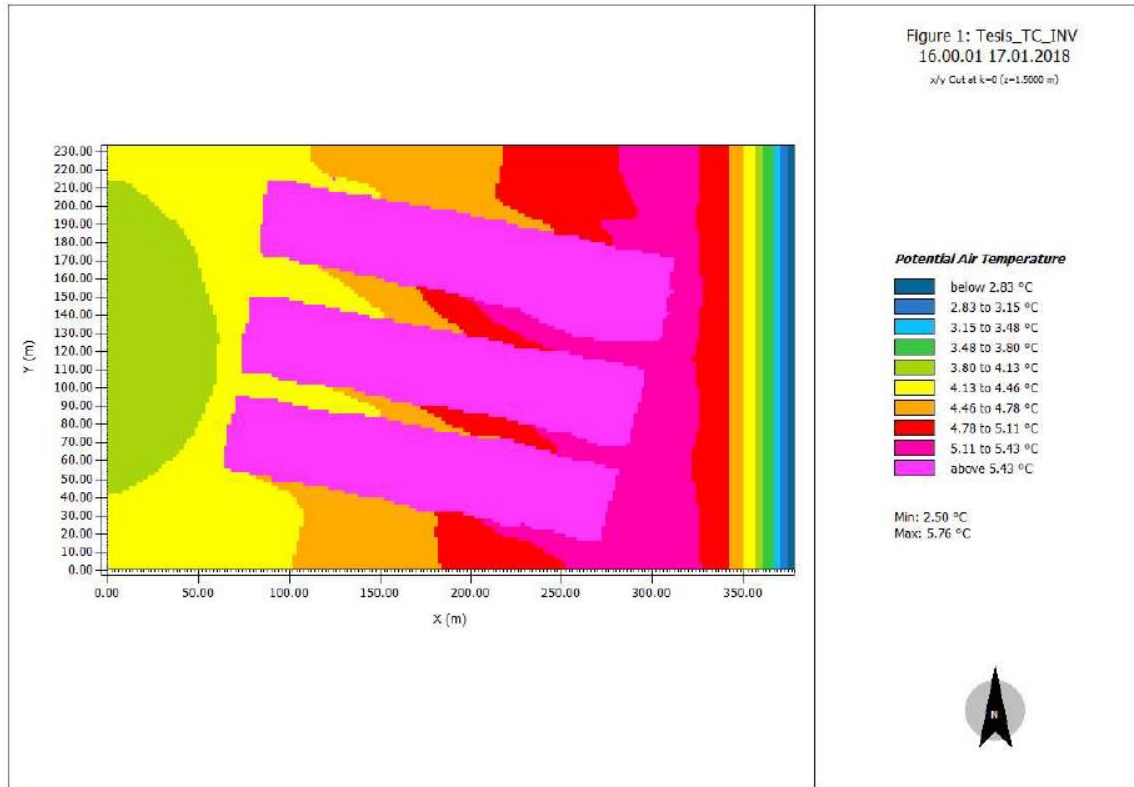


Figura 4.54. Temperatura de la superficie en escenario de Techo Convencional en la fecha de 17 de enero de 2018 a las 16:00 horas.

Por otro lado, en la figura 4.55 se presentan los resultados obtenidos del potencial de temperatura del aire en el escenario con la implementación del 50% de techos verdes extensivos en el área en cuestión. La modelación se realizó con las mismas condiciones a los del techo convencional a las 16:00 horas. En los resultados se muestra que la temperatura mínima es de 2.50°C y la máxima de 5.72°C. En comparación con el techo convencional, se muestra una disminución de 0.04°C en el potencial de temperatura del aire máximas.

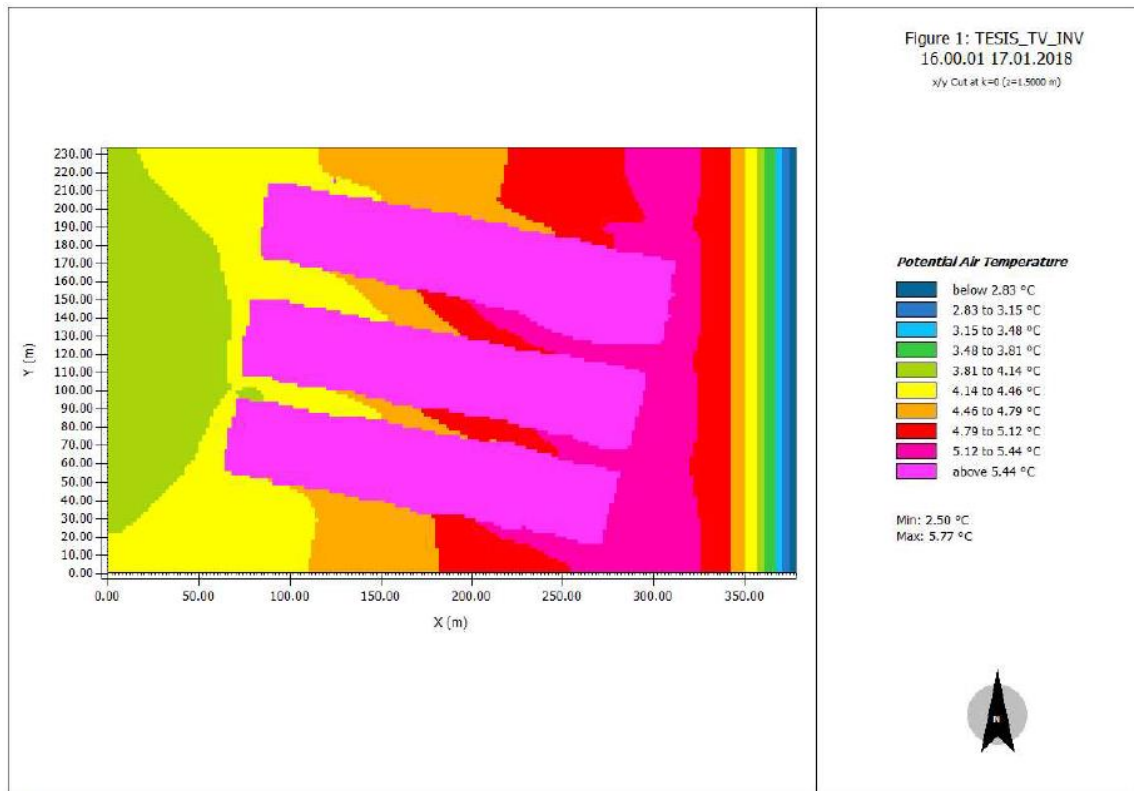


Figura 4.55. Temperatura de la superficie en escenario de Techo Verde en la fecha de 17 de enero de 2018 a las 16:00 horas.

SENSIBILIDAD EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Los resultados de la sensibilidad en la transferencia de calor, representa la magnitud de la relación con los cambios de temperatura de la superficie expresada en W/m^2 . La figura 4.56 muestra los resultados obtenidos la sensibilidad de transferencia de calor por medio de la modelación en el programa ENVI-met. Los resultados se presentan a la 07:00 horas en el escenario en el que el área de investigación se encuentra conformada por el 100% de techos convencionales. Aquí se muestra que la sensibilidad en la transferencia de calor mínima es de $0 W/m^2$ y la máxima de $77.56 W/m^2$. Siendo esto presentado a la hora de menor temperatura durante las 24 horas del presente día.

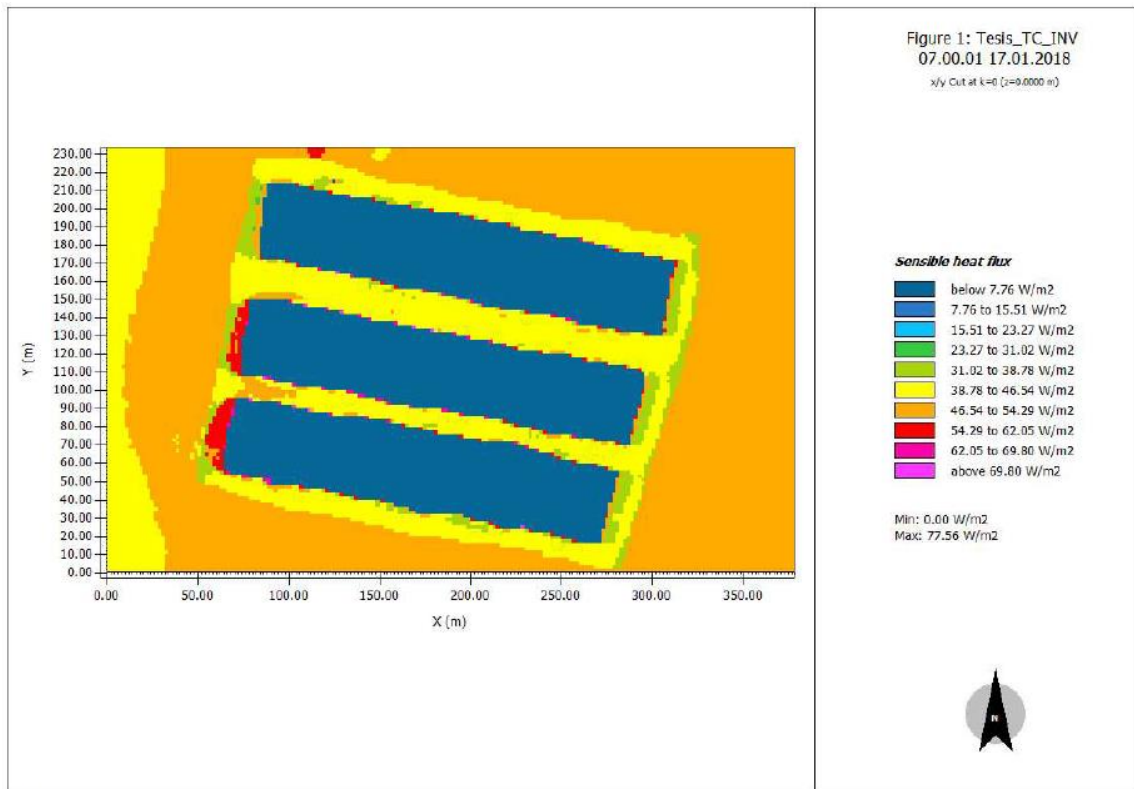


Figura 4.56. Sensibilidad a la transferencia de calor en escenario de Techo Convencional en la fecha de 17 de enero de 2018 a las 07:00 horas.

Por otro lado, en la figura 4.57 se presentan los resultados obtenidos de la sensibilidad en la transferencia de calor en el escenario con la implementación del 50% de techos verdes extensivos en el área en cuestión. La modelación se realizó con las mismas condiciones a los del techo convencional a las 07:00 horas. En los resultados se muestra que la sensibilidad en la transferencia de calor mínima es de 0 W/m² y la máxima de 78.30 W/m². En comparación con el techo convencional, la sensibilidad es 0.74 W/m² al escenario de techo convencional.

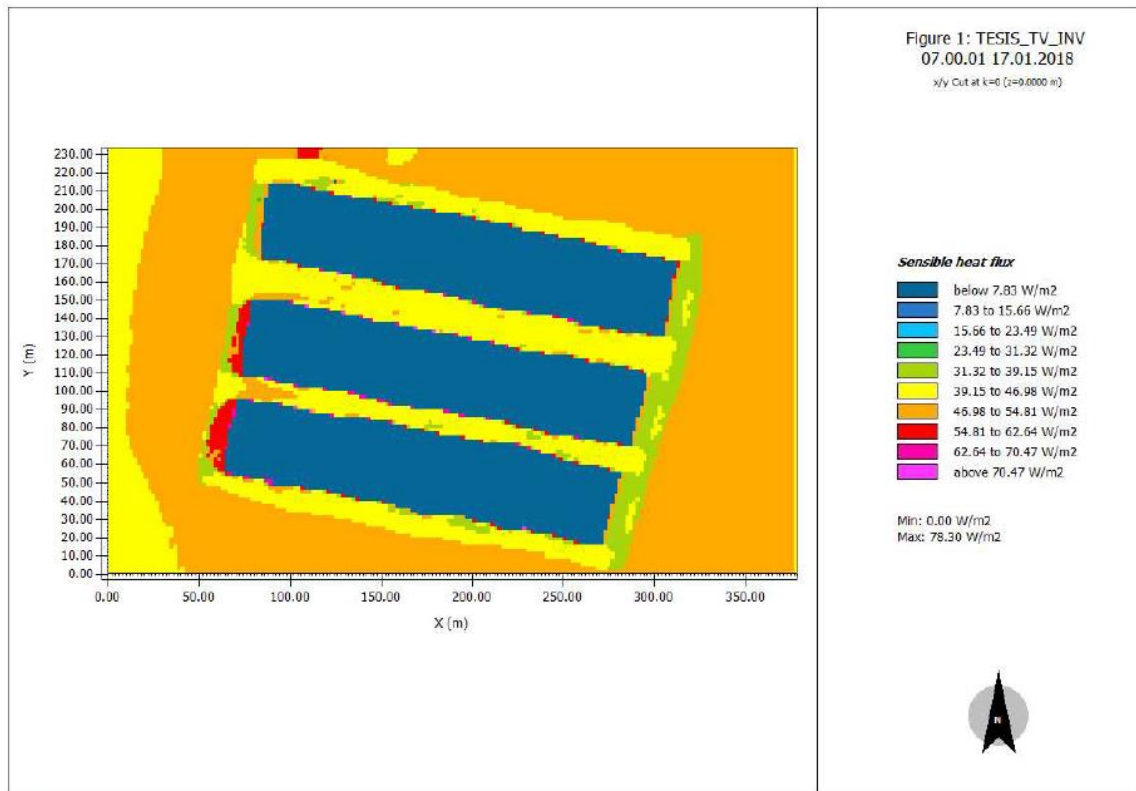


Figura 4.57. Sensibilidad a la transferencia de calor en escenario de Techo Verde en la fecha de 17 de enero de 2018 a las 07:00 horas.

En la figura 4.58 se presentan los resultados obtenidos de la sensibilidad de transferencia de calor por medio de la modelación en el programa ENVI-met. Los resultados se presentan a la 16:00 horas en el escenario en el que el área de investigación se encuentra conformada por el 100% de techos convencionales. Aquí se muestra que la sensibilidad en la transferencia de calor mínima es de 0 W/m² y la máxima de 401.66 W/m². Siendo esto presentado a la hora de mayor temperatura durante las 24 horas del presente día.

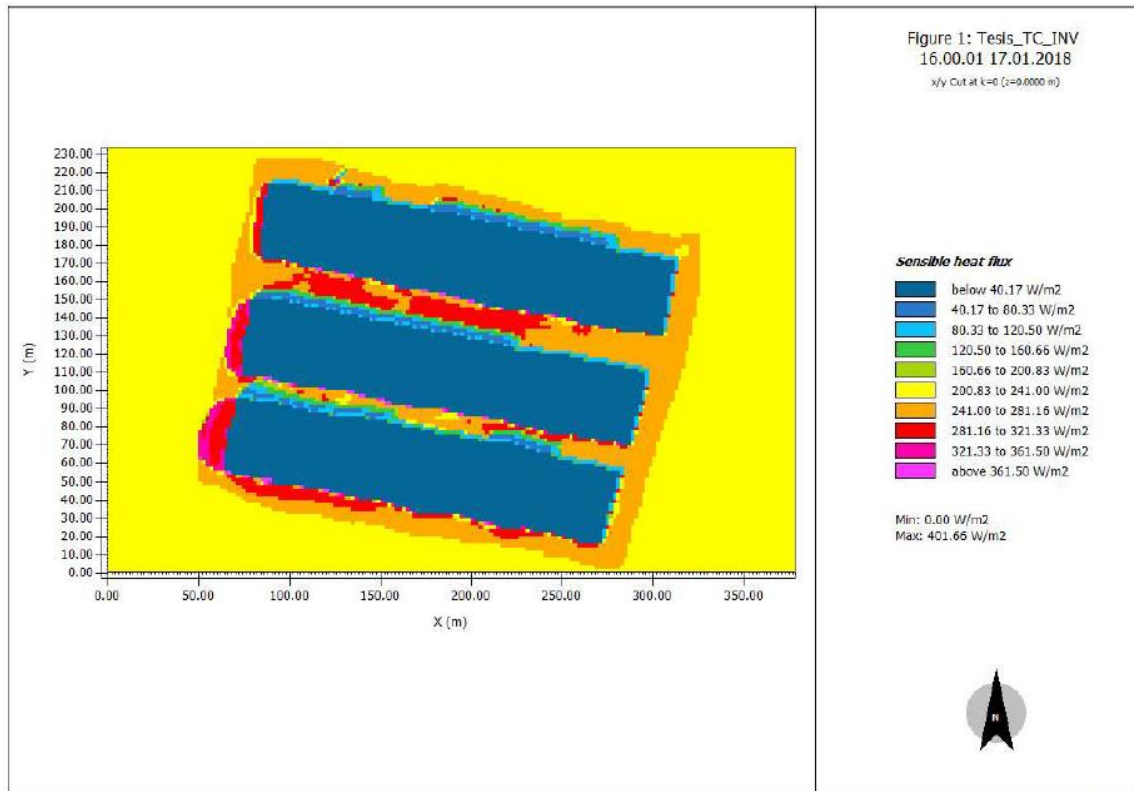


Figura 4.58. Sensibilidad a la transferencia de calor en escenario de Techo Convencional en la fecha de 17 de enero de 2018 a las 16:00 horas.

Por otro lado, en la figura 4.59 se presentan los resultados obtenidos de la sensibilidad de transferencia de calor en el escenario con la implementación del 50% de techos verdes extensivos en el área en cuestión. La modelación se realizó con las mismas condiciones a los del techo convencional a las 16:00 horas. En los resultados se muestra que la sensibilidad en la transferencia de calor mínima es de 0 W/m² y la máxima de 393.02 W/m². En comparación con el techo convencional, se muestra una disminución de 8.64 W/m² en la sensibilidad de transferencia de calor máximas.

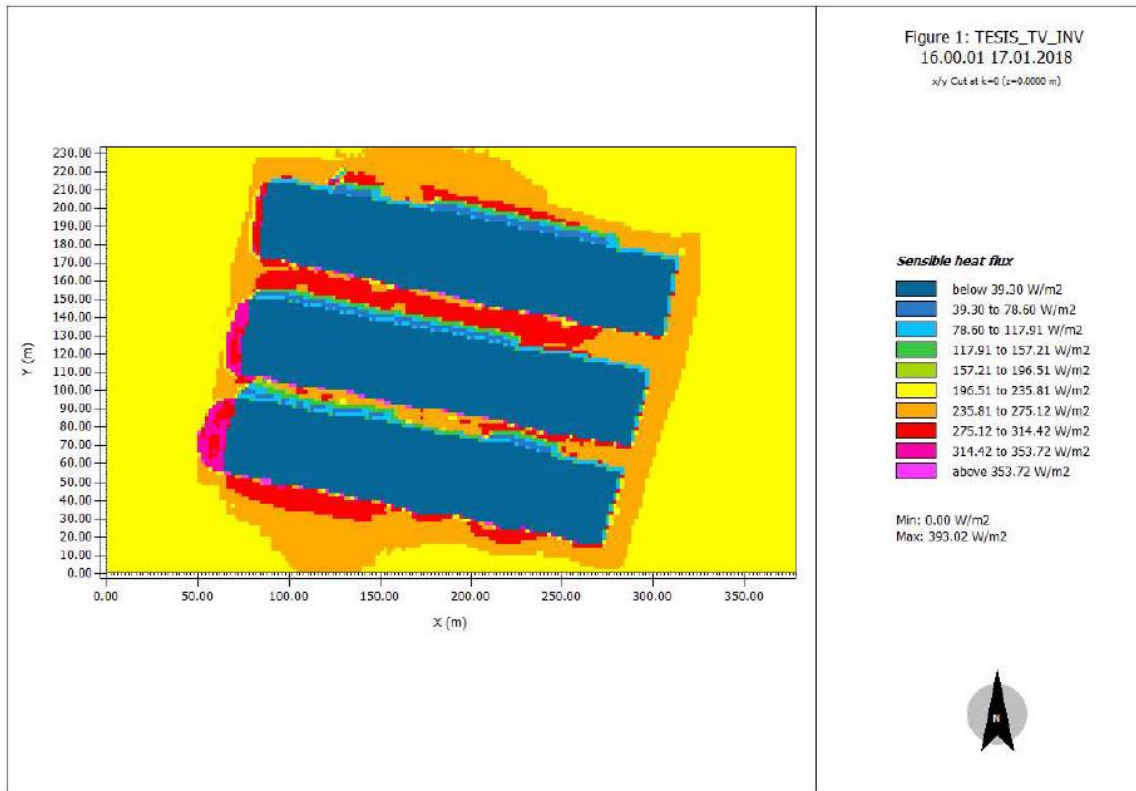


Figura 4.59. Sensibilidad a la transferencia de calor en escenario de Techo Verde en la fecha de 17 de enero de 2018 a las 16:00 horas.

TEMPERATURA SUPERFICIAL

Este parámetro es en referencia a la temperatura superficial en la época de invierno con la fecha de 17 de enero de 2018 presentado en el área en cuestión, representado por una gama de colores para ilustrar los valores de temperatura en la zona de investigación.

En la figura 4.60 se presentan los resultados obtenidos de la temperatura superficial por medio de la modelación en el programa ENVI-met. Los resultados se presentan a la 07:00 horas en el escenario en el que el área de investigación se encuentra conformada por el 100% de techos convencionales. Aquí se muestra que la temperatura mínima es de 2.07°C y la máxima de 19.85°C. Siendo esto presentado a la hora de menor temperatura durante las 24 horas del presente día.

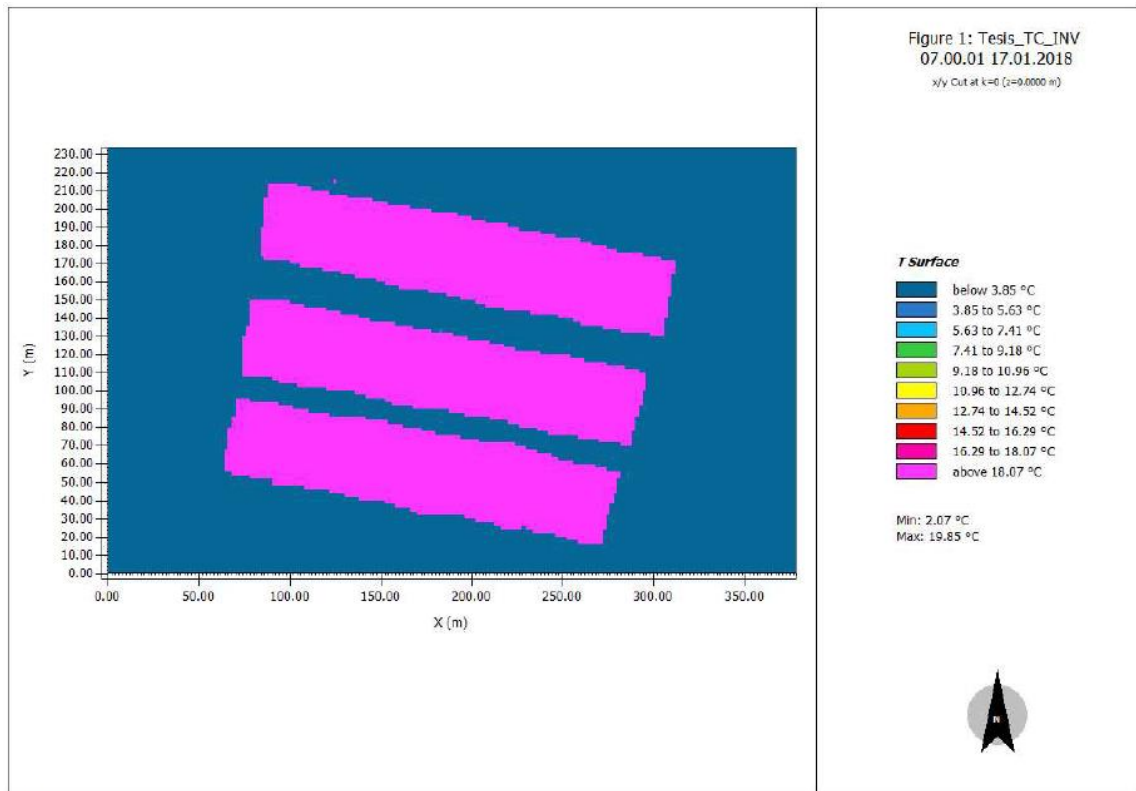


Figura 4.60. Temperatura de la superficie en escenario de Techo Convencional en la fecha de 17 de enero de 2018 a las 07:00 horas.

Por otro lado, en la figura 4.61 se presentan los resultados obtenidos de la temperatura superficial en el escenario con la implementación del 50% de techos verdes extensivos en el área en cuestión. La modelación se realizó con las mismas condiciones a los del techo convencional a las 07:00 horas. En los resultados se muestra que la temperatura mínima es de 1.96°C y la máxima de 19.85°C. En comparación con el techo convencional, se muestra una disminución de 0.11°C en la temperatura superficial.

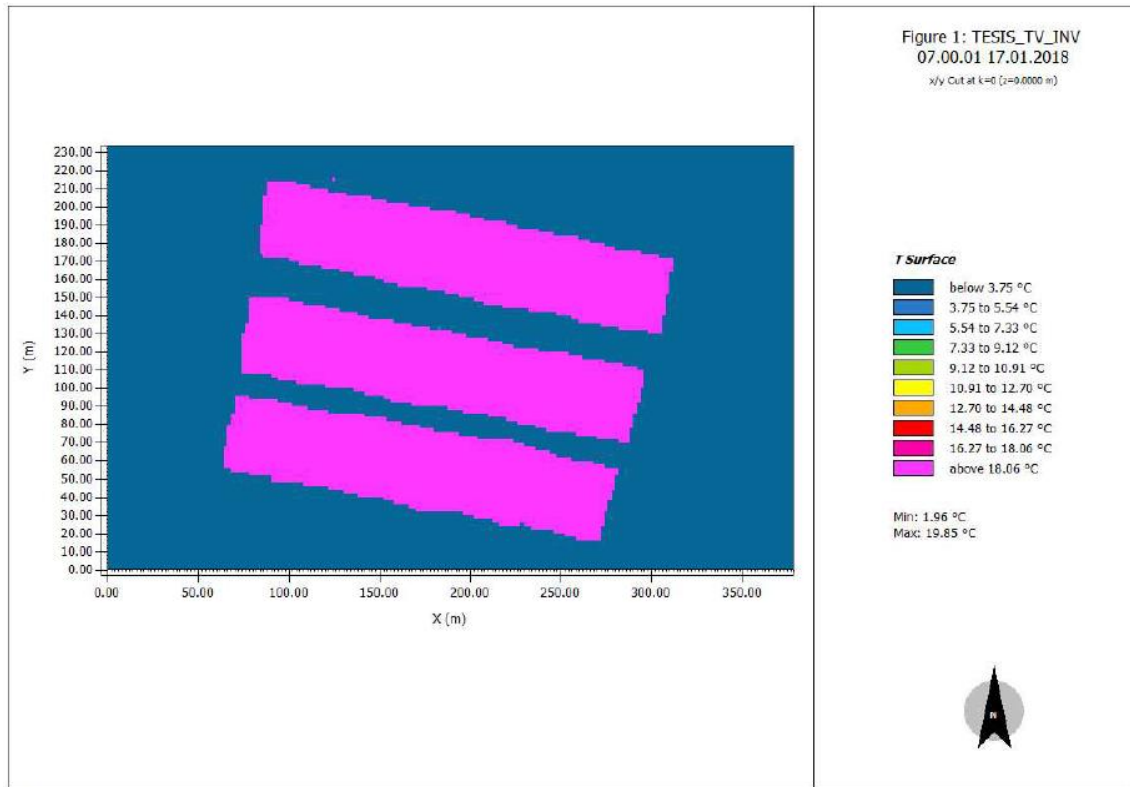


Figura 4.61. Temperatura de la superficie en escenario de Techo Verde en la fecha de 17 de enero de 2018 a las 07:00 horas.

En la figura 4.62 se presentan los resultados obtenidos de la temperatura superficial por medio de la modelación en el programa ENVI-met. Los resultados se presentan a la 16:00 horas en el escenario en el que el área de investigación se encuentra conformada por el 100% de techos convencionales. Aquí se muestra que la temperatura mínima es de 8.94°C y la máxima de 21.56°C. Siendo esto presentado a la hora de menor temperatura durante las 24 horas del presente día.

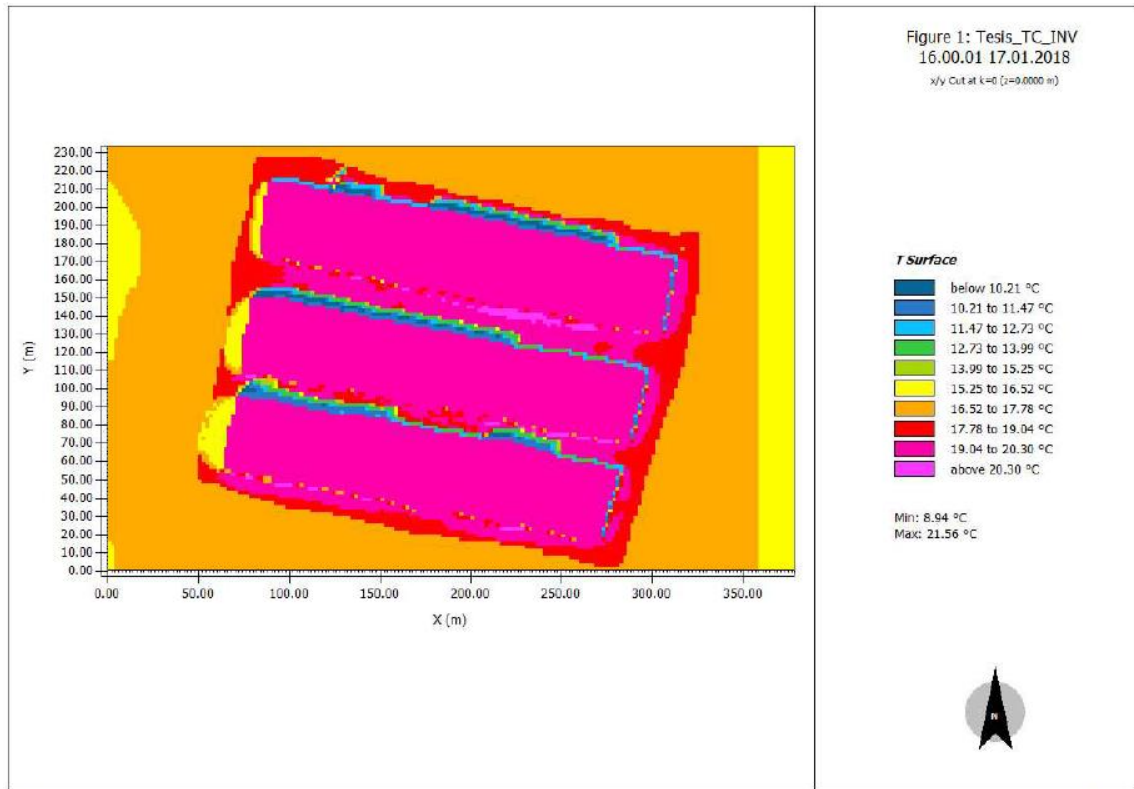


Figura 4.62. Temperatura de la superficie en escenario de Techo Convencional en la fecha de 17 de enero de 2018 a las 16:00 horas.

Por otro lado, en la figura 4.63 se presentan los resultados obtenidos de la temperatura superficial en el escenario con la implementación del 50% de techos verdes extensivos en el área en cuestión. La modelación se realizó con las mismas condiciones a los del techo convencional a las 16:00 horas. En los resultados se muestra que la temperatura mínima es de 8.92°C y la máxima de 21.56°C. En comparación con el techo convencional, se muestra una disminución de 0.02°C en la temperatura superficial.

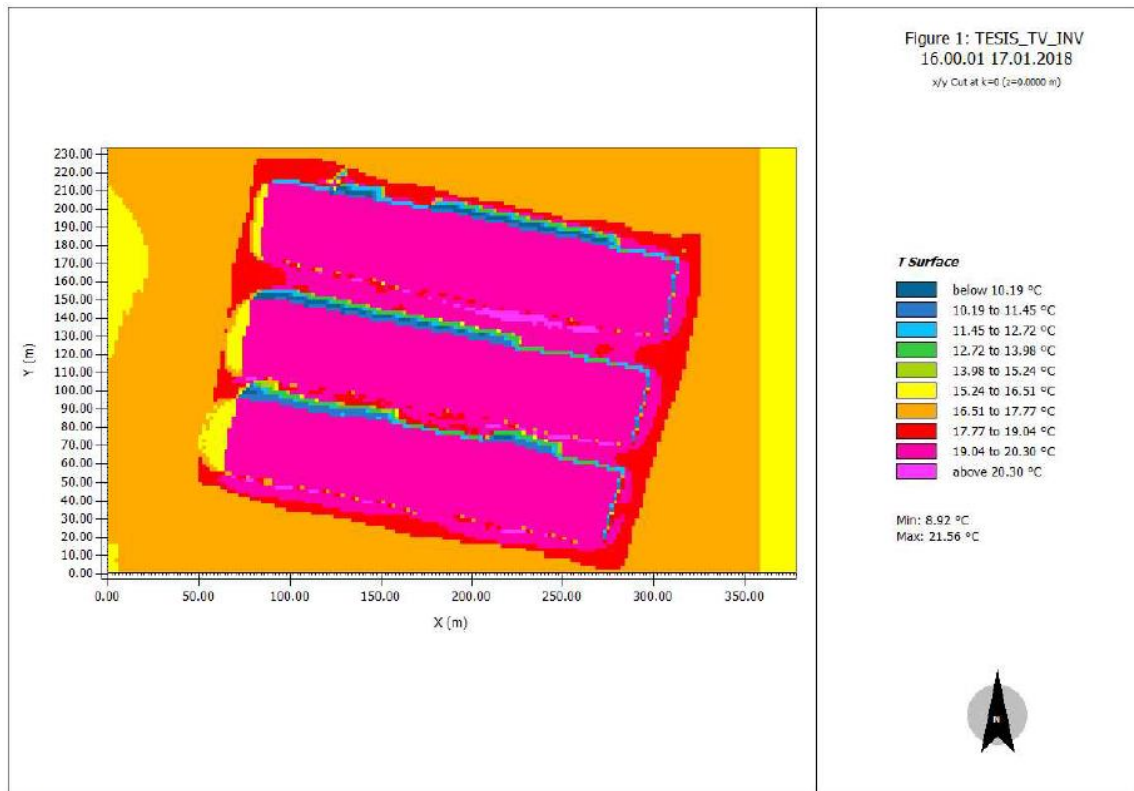


Figura 4.63. Temperatura de la superficie en escenario de Techo Verde en la fecha de 17 de enero de 2018 a las 16:00 horas.

4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LA MODELACIÓN A NIVEL MACRO ESCALA DE LOS TECHOS VERDES EXTENSIVOS

Esta parte de la investigación se centró en realizar un análisis de nivel macro escala por medio de una modelación en el programa ENVI-met de un área dentro del municipio de San Nicolás de los Garza, Nuevo León, en México, obteniendo su potencial de la temperatura de aire, la sensibilidad de flujo de calor y la temperatura en la superficie. Aquí se plantearon 2 escenarios, uno con la implementación de techos verdes extensivos y otro con techos convencionales, modelados en época de verano (08 de junio de 2019) y época de invierno (17 de enero de 2018), donde se presentó la temperatura más alta y más bajas del 2016 al 2020.

El primer parámetro a tomar en cuenta con la implementación de techos verdes extensivos es su potencial de la temperatura del aire, donde en verano, se obtuvo una

disminución de 0.47°C en comparación con el techo convencional. Mostafa Razzaghmanesh et al. (2016), mencionan que sus resultados mostraron en las simulaciones de la temperatura del aire de los techos verdes extensivos implementados en el 30% de los edificios, mostró una disminución de 0.70°C entre las 2 y 3 de la tarde en época de verano, lo cual coincide con los resultados de la presente investigación.

Por la modelación, fue posible determinar que en verano tiene un potencial en la disminución de la temperatura de la superficie de 2.30°C en época de verano en la hora pico del día (16:00 horas). Mostafa Razzaghmanesh et al. (2016), mencionan que en su modelación tuvieron un potencial de 0.06°C a 0.25°C , el cual no coincide con los datos presentes. En el caso de Ziaul & Pal (2020) realizaron una investigación del efecto de la Isla de Calor Urbana (UHI), con el programa ENVI-met, en varias condiciones de vegetación, donde el C3, es la aplicación del 100% de techos verdes. El área que seleccionaron para su modelación fue de $150\text{ m} * 170\text{ m}$ ($25,500\text{ m}^2$), cuando la de la presente investigación es de $42,286.13\text{ m}^2$. Los resultados que obtuvieron fueron que fue posible reducir la temperatura superficial desde 1.87°C hasta 2.60°C con la ecologización de techos y muros en un 50%. Que coinciden con los resultados presentes.

Asimismo, Asadi et al. (2020) con una simulación no-lineal de techos verdes a través de una red neuronal artificial, determinaron el comportamiento de la temperatura en la superficie al ecologizar el 3.2% del total de los edificios en una zona de 47.1276 Km^2 , dando como resultado, una disminución promedio de 1.96°C . En esta investigación mencionan que este fenómeno funciona mejor en edificio de entre 10 y 20 m, coincidiendo con los propios que es entre 5 y 15 metros al ser una zona residencial.

Los resultados de la sensibilidad al flujo de calor mostraron valores altos diurnos que muestra como un máximo de 439.25 W/m^2 en el escenario de techos convencionales y 379.89 W/m^2 con techos verdes extensivos, teniendo una diferencia de 59.36 W/m^2 en la sensibilidad de transferencia de calor máximas, siendo 13.51% menor. Estos datos no tienen coincidencia con los valores que se muestra en el análisis a micro escala y macro

escala de Mostafa Razzaghmanesh et al. (2016) y Mungur et al. (2020), pero tienen relación en el comportamiento, donde en el horario diurnos, los techos verdes transmiten el calor desde la superficie hacia el interior del edificio, y en el horario nocturno, actúan de forma contrario, donde el calor va desde el sustrato hacia la superficie del edificio (caso que no pasa con el techo convencional). Este efecto mantiene con temperaturas más bajas el interior del edificio (Chagolla-Aranda et al., 2017).

5. CONCLUSIONES

El principal objetivo de la investigación fue realizar un análisis a nivel micro y macro escala, por medio de prototipos de techos verdes extensivos y por modelación por el programa ENVI-met, respectivamente. Con el fin de determinar la influencia de la implementación de estas técnicas en un ambiente urbano.

A nivel micro escala se diseñaron e implementaron los prototipos de techos verdes extensivos, con los cuales fue posible determinar su comportamiento térmico a las profundidades de sustrato de 5,10 y 15 cm, así como el de un techo convencional. Los resultados obtenidos mostraron una estabilidad en las variaciones de temperatura a lo largo del día, tanto en verano como en invierno. En época de verano fue posible observar que los techos verdes extensivos mantienen temperaturas más bajas en los horarios de mayores temperaturas, llegando a disminuir la temperatura hasta 29.90°C, siendo un 54.46% en comparación con un techo convencional. En invierno, mantuvieron temperaturas más calidas, llegando a ser 5.60°C más altas. Esto tiene relación directa con mantener la temperatura dentro del edificio con mayor amenidad, lo que conlleva a menores consumos de energía, por su mantenimiento a temperaturas agradables. El prototipo de mejor rendimiento térmico fue el del PTVE3, con una profundidad de sustrato de 15 centímetros.

Por otro lado, a nivel macro escala, los resultados de la modelación de techos verdes extensivos en un área del municipio de San Nicolás de los Garza, Nuevo León, mostraron una disminución del potencial de la temperatura del aire de 0.47°C en verano, así como, una reducción de 2.30°C de la temperatura superficial y un decremento del 13.51% en la sensibilidad del flujo de calor. Por el contrario, en la época de invierno mostraron cambios de estos parámetros a menor medida, siendo más efectivos en verano que en invierno.

La evaluación del efecto que tienen los techos verdes extensivos a nivel micro y macro escala, permitió determinar la capacidad de esta tecnología para disminuir la temperatura en la superficie de un edificio con techos convencionales y la sensibilidad al flujo de calor del techo, así como el potencial de temperatura del aire. Estos efectos tienen beneficios en prolongar el tiempo de vida útil del techo y su influencia directa en la disminución del consumo de energía del edificio. También, promueve el incremento de la biodiversidad, la aplicación de tecnologías verdes en un ambiente urbano, provocando una sensación más amena en el uso del edificio al implementar espacios con vegetación y se encuentra dentro de las técnicas para el desarrollo sostenible urbano.

6. BIBLIOGRAFÍA

- (SADM), S. de A. y D. de M. (2020). Optimización de la red de distribución del Área Metropolitana de Monterrey mediante la técnica de modulación de presiones. Retrieved from SADM website: <https://www.sadm.gob.mx/>
- Akbari, H., & Rose, L. S. (2008). Urban Surfaces and Heat Island Mitigation Potentials. *Journal of the Human-Environment System*, 11(2), 85–101. <https://doi.org/10.1618/jhes.11.85>
- Alexandri, E., & Jones, P. (2008). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 43(4), 480–493. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.055>
- Alvarado, M. A., Rocha, A., & Moreno, S. (2010). De la Lechuguilla a las Biopelículas Vegetales: Las Plantas Útiles de Nuevo León. In *Universidad Autónoma de Nuevo León*. Nuevo León, México.
- Asadi, A., Arefi, H., & Fathipoor, H. (2020). Simulation of green roofs and their potential mitigating effects on the urban heat island using an artificial neural network: A case study in Austin, Texas. *Advances in Space Research*, 66(8), 1846–1862. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.06.039>
- Ascione, F., Bianco, N., de' Rossi, F., Turni, G., & Vanoli, G. P. (2013). Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? *Applied Energy*, 104, 845–859. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.068>
- Ávila-Hernández, A., Simá, E., Xamán, J., Hernández-Pérez, I., Téllez-Velázquez, E., & Chagolla-Aranda, M. A. (2020). Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico. *Energy and Buildings*, 209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109709>

- Beecham, S., & Razzaghmanesh, M. (2015). Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate. *Water Research*, 70, 370–384. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.12.015>
- Brown, M. L., Donovan, T. M., Schwenk, W. S., & Theobald, D. M. (2013). Predicting impacts of future human population growth and development on occupancy rates of forest-dependent birds - Acceso directo. *Biological Conservation*. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2013.07.039>
- Carpenter, C. M. G., Todorov, D., Driscoll, C. T., & Montesdeoca, M. (2016). Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations. *Environmental Pollution*, 218, 664–672. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.056>
- Chagolla-Aranda, M. A., Simá, E., Xamán, J., Álvarez, G., Hernández-Pérez, I., & Téllez-Velázquez, E. (2017). Effect of irrigation on the experimental thermal performance of a green roof in a semi-warm climate in Mexico. *Energy and Buildings*, 154, 232–243. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.082>
- Chan, A. L. S., & Chow, T. T. (2013). Energy and economic performance of green roof system under future climatic conditions in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 64, 182–198. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.015>
- Chen, A., Lu, J., Yuan, J., Xu, Y., & Yang, Z. (2015). Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Zhongshan Daxue Xuebao/Acta Scientiarum Natralium Universitatis Sunyatseni*, 54(1), 89–95. <https://doi.org/10.1347/j.cnki.acta.snus.2015.01.018>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). Servicio Meteorologico Nacional. Retrieved from CONAGUA website: <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2021). Portal de geoinformacion 2021. Retrieved from CONABIO website: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

- Connelly, M., & Hodgson, M. (2013). Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs. *Applied Acoustics*, 74(10), 1136–1143. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.04.003>
- Cristiano, E., Urru, S., Farris, S., Ruggiu, D., Deidda, R., & Viola, F. (2020). Analysis of potential benefits on flood mitigation of a CAM green roof in Mediterranean urban areas. *Building and Environment*, 183, 107179. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107179>
- Du, J., Fu, Q., Fang, S., Wu, J., He, P., & Quan, Z. (2019). Effects of rapid urbanization on vegetation cover in the metropolises of China over the last four decades. *Ecological Indicators*, Vol. 107, p. 105458. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105458>
- ENVI-met. (2021). ENVI-met: A Holistic Microclimate Model. Retrieved from ENVI-met Support website: <https://envi-met.info/doku.php?id=start>
- Freund, J. E., Miller, I., & Miller, M. (2000). *Estadística matemática con aplicaciones* (6ta Edició). Ciudad de México, México: Prentice Hall.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. del P. (2010). *Metodología de la Investigación* (Quinta; J. M. Chacón, Ed.). Ciudad de México, México: McGraw-Hill.
- Huang, J., Liu, J., Zhang, W., Cai, X., Liu, L., Zheng, M., & Mo, J. (2019). Effects of urbanization on plant phosphorus availability in broadleaf and needleleaf subtropical forests. *Science of the Total Environment*, 684(723), 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.325>
- Huelsz, G., Barrios, G., & Rojas, J. (2014). Differences on results from steady-state and time-dependent wall/roof heat transfer models in Mexican climates. *Energy Procedia*, 57, 1825–1833. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.046>
- Jim, C. Y. (2017). An archaeological and historical exploration of the origins of green roofs. *Urban Forestry and Urban Greening*, 27, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.014>

- Jim, C. Y., & Tsang, S. W. (2011). Ecological energetics of tropical intensive green roof. *Energy and Buildings*, 43(10), 2696–2704. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.018>
- Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., Shaffer, P., Wallingford, H. R., & Wallingford, H. R. (2007). *The SuDS manual*.
- Khotbehsara, E. M., Daemei, A. B., & Malekjahan, F. A. (2019). Simulation study of the eco green roof in order to reduce heat transfer in four different climatic zones. *Results in Engineering*, 2(March), 100010. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100010>
- Liu, C., & Hornikx, M. (2018). Effect of water content on noise attenuation over vegetated roofs: Results from two field studies. *Building and Environment*, 146(July), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.022>
- Liu, L., Cao, J., Ali, M., Zhang, J., & Wang, Z. (2021). Impact of green roof plant species on domestic wastewater treatment. *Environmental Advances*, 4(August 2020), 100059. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100059>
- Liu, W., Wei, W., Chen, W., Deo, R. C., Si, J., Xi, H., ... Feng, Q. (2019). The impacts of substrate and vegetation on stormwater runoff quality from extensive green roofs. *Journal of Hydrology*, 576(April), 575–582. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.061>
- Mungur, M., Poorun, Y., Juggurnath, D., Ruhomally, Y. B., Rughooputh, R., Dauhoo, M. Z., ... Facknath, S. (2020). A numerical and experimental investigation of the effectiveness of green roofs in tropical environments: The case study of Mauritius in mid and late winter. *Energy*, 202, 117608. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117608>
- NASA. (2021). Global Climate Change: Vital Signs of the Planet. Retrieved from <https://climate.nasa.gov/>
- Palla, A., & Gnecco, I. (2015). Hydrologic modeling of Low Impact Development systems

- at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology*, 528, 361–368.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050>
- Polo-Labarrios, M. A., Quezada-García, S., Sánchez-Mora, H., Escobedo-Izquierdo, M. A., & Espinosa-Paredes, G. (2020). Comparison of thermal performance between green roofs and conventional roofs. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21(June).
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100697>
- Porcaro, M., Ruiz de Adana, M., Comino, F., Peña, A., Martín-Consuegra, E., & Vanwalleghem, T. (2019). Long term experimental analysis of thermal performance of extensive green roofs with different substrates in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 197, 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.041>
- Razzaghmanesh, M., Beecham, S., & Kazemi, F. (2012). The role of green roofs in water sensitive Urban design in South Australia. *WSUD 2012 - 7th International Conference on Water Sensitive Urban Design: Building the Water Sensitive Community, Final Program and Abstract Book*, (February 2012).
<https://doi.org/10.13140/2.1.5030.4807>
- Razzaghmanesh, Mostafa, Beecham, S., & Salemi, T. (2016). The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. *Urban Forestry and Urban Greening*, 15, 89–102.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.11.013>
- Rowe, D. B. (2011). Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 2100–2110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.029>
- Sahoo, P. (2015). *Probability and Mathematical Statistics*. Louisville, Estados Unidos: Department of Mathematics, University of Louisville.
- Secretaria del Medio Ambiente. (2017). Trámites de Constancias de Reducción e Incentivos Fiscales. Retrieved from Gobierno de Ciudad de México website: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/servicios/servicio/constancias-de-regulacion-e-incentivos-fiscales>

- Shafique, M., Kim, R., & Rafiq, M. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90(April 2017), 757–773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>
- Shi, D., Gao, Y., Guo, R., Levinson, R., Sun, Z., & Li, B. (2019). Life cycle assessment of white roof and sedum-tray garden roof for office buildings in China. *Sustainable Cities and Society*, 46(December 2018), 101390. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.12.018>
- Silva, C. M., Gomes, M. G., & Silva, M. (2016). Green roofs energy performance in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 116, 318–325. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.012>
- Song, C., Liu, Q., Gu, S., & Wang, Q. (2018). The impact of China's urbanization on economic growth and pollutant emissions: An empirical study based on input-output analysis. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1289–1301. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.058>
- Speak, A. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J., & Smith, C. L. (2012). Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. *Atmospheric Environment*, 61, 283–293. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.043>
- Triola, M. F. (2009). Estadísticas. In *Cultura, Lenguaje y Representación* (10ma Edici, Vol. 16). <https://doi.org/10.6035/clr.2016.16.10>
- United Nations, DESA, P. D. (2018). *World Urbanization Prospects*. Retrieved from <https://www.un.org/en/>
- Van Renterghem, T., & Botteldooren, D. (2014). Influence of rainfall on the noise shielding by a green roof. *Building and Environment*, 82, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.025>
- Vargas, N., & Magaña, V. (2020). Climatic risk in the Mexico city metropolitan area due to urbanization. *Urban Climate*, Vol. 33. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100644>

- Vijayaraghavan, K., & Joshi, U. M. (2015). Application of seaweed as substrate additive in green roofs: Enhancement of water retention and sorption capacity. *Landscape and Urban Planning*, *143*, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.06.006>
- Vijayaraghavan, K., & Raja, F. D. (2014). Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption. *Water Research*, *63*, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.012>
- Voyde, E., Fassman, E., & Simcock, R. (2010). Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand. *Journal of Hydrology*, *394*(3–4), 384–395. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.013>
- Wang, X., Hui, E. C., & Sun, J. (2017). Population migration , urbanization and housing prices : Evidence from the cities in China. *Habitat International*, *66*, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.05.010>
- Wanielista, M., Kersten, R., & Eaglin, R. (1997). *Hydrology, Water Quantity and Quality Control*. Nueva Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- Williams, K. J. H., Lee, K. E., Sargent, L., Johnson, K. A., Rayner, J., Farrell, C., ... Williams, N. S. G. (2019). Appraising the psychological benefits of green roofs for city residents and workers. *Urban Forestry & Urban Greening*, *44*(May), 126399. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126399>
- Wilson, S., Bray, B., & Cooper, P. (2004). *Sustainable Drainage Systems: Hydraulic , structural and water* (Vol. 44). Londres, Inglaterra: CIRIA.
- Yang, J., Mohan Kumar, D. Ilamathy, Pyrgou, A., Chong, A., Santamouris, M., Kolokotsa, D., & Lee, S. E. (2018). Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate. *Solar Energy*, *173*(August), 597–609. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.006>
- Zhang, X., Shen, L., & Wu, Y. (2011). Green strategy for gaining competitive advantage in housing development: A China study. *Journal of Cleaner Production*, *19*(2–3), 157–

167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.005>

Ziaul, S., & Pal, S. (2020). Modeling the effects of green alternative on heat island mitigation of a meso level town, West Bengal, India. *Advances in Space Research*, 65(7), 1789–1802. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.12.031>