

ANÁLISIS DEL FENÓMENO DE ISLAS DE CALOR EN EL CENTRO DE LA
CIUDAD DE BUCARAMANGA

GERMAN ANDRÉS VELASCO MANTILLA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2016

ANÁLISIS DEL FENÓMENO DE ISLAS DE CALOR EN EL CENTRO DE LA
CIUDAD DE BUCARAMANGA

GERMAN ANDRÉS VELASCO MANTILLA

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Director

JULIÁN E. JARAMILLO IBARRA

Ph.D en Ingeniería Térmica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

A mis padres por su esfuerzo, entrega, dedicación y ayuda incondicional a lo largo de estos años, por su comprensión en aquellos momentos de estrés y preocupación y por su apoyo en cada paso que doy.

A mi hermano, por su manera inconfundible de ayudar al no facilitarme las cosas, enseñándome así que soy yo el único medio para lograr mis metas.

A mi flaca, por soportar tantos desplantes por estar estudiando, por escuchar largas conversaciones sobre cosas que no entendía y por siempre lograr llenarme de serenidad para enfrentar nuevos desafíos.

AGRADECIMIENTOS

A mi primo y arquitecto Fabían Andrés Vargas Mantilla, por permitirme disponer de su proyecto de grado “Renovación Urbana - Sector centro”.

Al señor Gustavo Alberto Parra Turbay, por prestarme desinteresadamente la terraza del edificio Rafael J. Turbay e Hijos S.A, para la instalación de la estación meteorológica.

A mis compañeros y amigos Cristhian, Daní, Miguel y Omar, por sus críticas, sugerencias y acompañamiento en el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	20
1.1. OBJETIVO GENERAL	20
1.2. OBEJTIVOS ESPECÍFICOS	20
1.2.1. Realizar la construcción virtual del centro de la ciudad de Bucaramanga. ..	20
1.2.2. Establecer condiciones metabólicas y demográficas de los habitantes	20
1.2.3. Realizar la simulación de la difusión de contaminantes y distribución de. ...	21
1.2.4. Evaluar el bienestar térmico de los habitantes de en el centro de la ciudad.	21
2. METODOLOGÍA.....	22
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
2.2. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	22
2.3. MARCO TEÓRICO	23
2.3.1. Microclima urbano.....	23
2.3.2. Confort térmico urbano.....	25
2.3.3. Evaluación del confort térmico.....	27
2.3.4. Envi-met.....	28

2.4. RECOLECCIÓN DE DATOS	30
2.4.1. Datos arquitectónicos.	30
2.4.2. Datos meteorológicos.	32
3. MODELAMIENTO	33
3.1. ESPACIO.....	34
3.2. SUELOS	36
3.3. EDIFICIOS.....	39
3.4. VEGETACIÓN	40
4. CONFIGURACIÓN	43
4.1. AREA.....	44
4.2. TIEMPOS Y FECHA	45
4.3. DATOS METEOROLÓGICOS.....	46
4.3.1. Datos básicos.....	46
4.3.2. Datos meteorológicos específicos.....	47
4.3.3. Más ajustes meteorológicos.....	48
4.4. TIEMPO DE MODELAMIENTO.....	49
4.5. SUELOS Y PLANTAS	50
4.6. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES Y SIMULACIÓN.....	52
5. RESULTADOS	54

5.1. TEMPERATURA DEL AIRE.....	54
5.1.1. Análisis de la temperatura del aire a lo largo de las calles.	54
5.1.2. Análisis de la temperatura del aire a lo largo de las carreras.....	61
5.1.3. Análisis de la temperatura del aire en patios y parques.	67
5.2. VELOCIDAD DEL VIENTO	71
5.3. CONTAMINACIÓN POR DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂).....	74
5.4. ÍNDEICE DE VOTO MEDIO ESTIMADO (PMV).....	77
5.5. PORCETANJE ESTIMADO DE INSATISFECHOS (PPD).....	83
6. CONCLUSIONES	90
7. RECOMENDACIONES.....	92
BIBLIOGRAFIA	93
ANEXOS.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perfil de una isla de calor urbana.....	24
Figura 2. Intercambio de energía entre el ser humano y su entorno.....	26
Figura 3. Variación del microclima en el campus de la Universidad del Sur de California.....	29
Figura 4. Plano y vista en 3D de la zona de estudio.	31
Figura 5. Estación meteorológica portátil ubicada en la terraza del edificio Turbay.	32
Figura 6. Módulo “Space” de Envi-met.....	33
Figura 7. Ventana de ajustes generales del modelo.	34
Figura 8. Plano de distribución de suelos en el sector.....	38
Figura 9. Muestra del plano de edificaciones en la ventana "Space"	39
Figura 10. Modelo en 3D de edificaciones en el centro de Bucaramanga.	40
Figura 11. Distribución de la vegetación en el sector.....	41
Figura 12. Modelo en 3D con la vegetación presente en el sector.....	42
Figura 13. Ventana principal del módulo "ConfigWizard"	43
Figura 14. Ventana "Area Input file" del módulo "ConfigWizard".....	44
Figura 15. Ventana "Time and Date, Output" del módulo "ConfigWizard".....	45
Figura 16. Datos meteorológicos específicos.	48
Figura 17. Tiempos de modelado.....	50
Figura 18. Ajustes de suelos y plantas.....	51
Figura 19. Ajustes para la dispersión de contaminante.....	52
Figura 20. Mapa térmico del centro de Bucaramanga a las 10:00 am, el día 10 de Julio de 2016, con señalización en puntos de estudio a lo largo de las calles.....	55
Figura 21. Temperatura del aire hora a hora a lo largo de la calle 36, desde la carrera 15 hasta la carrera 21, los días 9 y 10 de Julio de 2016.	56
Figura 22. Temperatura del aire hora a hora a lo largo de la calle 35, desde la carrera 15 hasta la carrera 21, los días 9 y 10 de Julio de 2016.	56

Figura 23. Temperatura del aire hora a hora a lo largo de la calle 34, desde la carrera 15 hasta la carrera 21, los días 9 y 10 de Julio de 2016.	57
Figura 24. Temperatura del aire hora a hora a lo largo de la calle 33, desde la carrera 15 hasta la carrera 21, los días 9 y 10 de Julio de 2016.	57
Figura 25. Temperatura del aire hora a hora a lo largo de la calle 32, desde la carrera 15 hasta la carrera 21, los días 9 y 10 de Julio de 2016.	58
Figura 26. Temperatura del aire hora a hora a lo largo de la Avenida Quebrada Seca, desde la carrera 15 hasta la carrera 21, los días 9 y 10 de Julio de 2016...	58
Figura 27. Mapa térmico del centro de Bucaramanga a las 10:00 am, el día 10 de Julio de 2016, con señalización en puntos de estudio a lo largo de las carreras...	61
Figura 28. Temperatura del aire hora a hora a lo largo de la carrera 15, desde la calle 36 hasta la Avenida Quebrada Seca, los días 9 y 10 de Julio de 2016.	62
Figura 29. Temperatura del aire hora a hora a lo largo de la carrera 18, desde la calle 36 hasta la Avenida Quebrada Seca, los días 9 y 10 de Julio de 2016.	62
Figura 30. Temperatura del aire hora a hora a lo largo de la carrera 21, desde la calle 36 hasta la Avenida Quebrada Seca, los días 9 y 10 de Julio de 2016.	63
Figura 31. Comparativo de la temperatura entre la carrera 15 con calle 36 y la Avenida Quebrada Seca con carrera 21.	65
Figura 32. Mapa térmico del centro de Bucaramanga a las 10:00 pm, el día 10 de Julio de 2016, con señalización del área que comprende la isla de calor urbano.	66
Figura 33. Mapa térmico del centro de Bucaramanga a las 10:00 pm, el día 10 de Julio de 2016, con señalización de parques, patios y puntos críticos.	68
Figura 34. Temperatura del aire hora a hora entre parques y puntos críticos los días 9 y 10 de Julio de 2016.	69
Figura 35. Temperatura del aire hora a hora entre algunos patios del sector y los puntos críticos, los días 9 y 10 de Julio de 2016.	70
Figura 36. Mapa con velocidades del viento y su dirección a las 12:00 horas el día 10 de julio de 2016.	71
Figura 37. Velocidad del viento, hora a hora entre los parques Santander y Centenario con respecto a los puntos críticos.	72

Figura 38. Velocidad del viento, hora a hora en patios con respecto a los puntos críticos.	73
Figura 39. Concentración de dióxido de carbono en el centro de la ciudad de Bucaramanga.....	75
Figura 40. Propagación de dióxido de carbono en el centro de la ciudad.....	76
Figura 41. Propagación en 3D del dióxido de carbono en el ambiente.	76
Figura 42. Mapa térmico para el índice PMV a las 11:00 am del día 10 de julio de 2016.....	79
Figura 43. Índice PMV en diferentes calles del centro de la ciudad.	80
Figura 44. Índice PMV en los parques del centro de la ciudad con respecto a la Avenida Quebrada Seca.....	81
Figura 45. Radiación infra roja para el parque Santander y Centenario.	83
Figura 46. Índice PPD en diferentes calles del centro de la ciudad.	84
Figura 47. Índice PPD en los parques del centro de la ciudad con respecto a la avenida Quebrada Seca.	84
Figura 48. Comparativo del índice PPD y la radiación en la intersección de la calle 36 con carrera 15.....	85
Figura 49. Comparativo del índice PPD y la radiación infra roja, en la carrera 19 entre calles 35 y 34.....	86
Figura 50. Comparativo del índice PPD y la radiación infra roja, en la carrera 16 entre calles 33 y 32.....	86
Figura 51. Comparativo de la radiación en un punto de la ciudad.	87
Figura 52. PPD en función del PMV en la intersección de la calle 36 con carrera 15	88
Figura 53. PPD en función del PMV en el parque Santander	89
Figura 54. PPD en función del PMV en la avenida Quebrada Seca con carrera 21.	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos geométricos.....	35
Tabla 2. Datos geográficos.....	35
Tabla 3. Tipos de suelos identificados.....	37
Tabla 4. Datos meteorológicos básicos.....	46
Tabla 5. Valores de la temperatura en los puntos de mayor impacto y su variación	59
Tabla 6. Valores de la temperatura en los puntos de mayor impacto y su variación a lo largo de las carreras.	64
Tabla 7. Valores de la temperatura en 2 puntos críticos y su variación.....	65
Tabla 8. Escala numérica de sensación térmica.	77
Tabla 9. Características metabólicas para los habitantes del centro de la ciudad de Bucaramanga.....	78
Tabla 10. Listado de puntos de estudio para análisis del índice de PMV	80
Tabla 11. Valores del índice PMV durante el día 10 de Julio de 2016	81

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Datos Meteorológico para los días 9 y 10 de julio de 2016, tomados con la estación meteorológica instalada en el edificio Turbay.	95
ANEXO B. Mapas térmicos del centro de la ciudad de Bucaramanga, hora a hora durante el día 10 de julio de 2016.....	99

RESUMEN

TITULO DEL PROYECTO: ANÁLISIS DEL FENOMENO DE ISLAS DE CALOR EN EL CENTRO DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA

AUTORES: German Andrés Velasco Mantilla

PALABRAS CLAVE: Islas de calor, simulación, confort térmico, condiciones climáticas, calentamiento global, Transferencia de calor, Bucaramanga, Envi-met.

DESCRIPCIÓN:

Es de conocimiento general que el crecimiento urbanístico lleva consigo a la disminución de zonas verdes; estos hechos dan a las ciudades características climáticas propias, que se pueden observar desde dos puntos de vista geográficos: por una parte, el comportamiento diferente entre el núcleo urbano y el medio rural más cercano; por otro lado, los contrastes dentro de la misma ciudad, los cuales son atribuidos a las variadas formas de sus edificios, materiales, actividad humana e industrial. Este fenómeno se conoce con el nombre de “Islas de calor” y en la actualidad se ha convertido en una problemática mundial.

Este proyecto busca analizar el efecto de dicho fenómeno en el centro de la ciudad de Bucaramanga mediante el software Envi-met. Este software es un modelo no hidrostático tridimensional integral, para la simulación de las interacciones planta-aire-superficie, que permite estudiar el comportamiento térmico y medioambiental, mediante condiciones climáticas conocidas como: Temperatura, humedad, velocidad del viento, dirección del viento, latitud, longitud, entre otras. Envi-met es un software desarrollado en el lenguaje de programación Object Pascal que usa el método de elementos finitos para solucionar ecuaciones diferenciales de transferencia de calor y mecánica de fluidos; proporcionando finalmente mapas térmicos y tablas de datos que brindan la información suficiente para detectar posibles islas de calor.

Por otra parte, el proyecto también da a conocer los índices PMV (Predicted Mean Vote) y PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) de los habitantes del sector simulado, permitiendo así saber el grado de satisfacción de estos con respecto a la sensación térmica de la ciudad.

*Proyecto de grado.

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.
Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE PHENOMENON OF HEAT ISLANDS IN THE DOWNTOWN OF BUCARAMANGA

AUTHORS: German Andrés Velasco Mantilla

KEY WORDS: Heat islands, simulation, thermal comfort, weather, global warming, heat transfer, Bucaramanga, Envi-met.

DESCRIPTION:

It is from common knowledge that the urban growth reduces the green areas; These facts give to the cities their own climatic characteristics, which can be seen from two geographic views: The different behavior between the city center and the nearest rural areas and the differences within the same city, which are attributed to the various forms of its buildings, materials, human and industrial activity. This phenomenon is known as "heat islands" and it has become a global problem.

This project analyzes the effect of "heat islands" in the center of the city of Bucaramanga by the Envi-met software. This software is a three-dimensional non-hydrostatic model for simulation of plant-air-surface, which allows to study the thermal and environmental behavior with the climatic conditions known: temperature, humidity, wind speed, wind direction, latitude, longitude, among others. Envi-met is a software developed in Object Pascal programming language that uses the finite element method to solve differential equations of heat transfer and fluid mechanics and provide thermal maps in 2 and 3 dimensions who show the enough information to detect the phenomenon of "heat islands".

Additionally, the project also discloses the index of PMV (Predicted Mean Vote) and PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) of the habitants of the simulated field, allowing to know the degree of satisfaction of the people with the climate of the city.

*Graduation project.

**Faculty of Physics-Mechanic Engineerings. School of Mechanical Engineering. Director: Julian Ernesto Jaramillo Ibarra.

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población y el desarrollo acelerado de las ciudades ha llevado consigo un crecimiento de la infraestructura urbana, en especial la de edificación y transporte. El crecimiento de estos tipos de infraestructura requiere a su vez la disminución drástica de zonas verdes, comenzando desde la parte central hasta la periferia. En la actualidad se ha perdido casi un 70% de zonas verdes que alguna vez contribuyeron con el confort térmico de las ciudades.

Las inmensas masas de hormigón como edificios, centros comerciales y vías de transporte, absorben calor durante todo el día y lo liberan durante la noche. En particular las vías pavimentadas emiten un gran porcentaje de la radiación que llega a ellas al calentarse. Si a esto también se suma la actividad humana e industrial, se puede ver como la calidad de vida en cuanto a confort térmico se refiere, se afecta de manera negativa debido a que no hay zonas verdes que mitiguen el aumento de temperatura provocado por esto. Este fenómeno es conocido con el nombre de islas de calor urbano (ICU) haciendo referencia a zonas de mayor temperatura dentro de un mismo entorno o la comparación de temperaturas del sector urbano con el rural. Este problema lleva consigo a que la población busque soluciones, que en la mayoría de los casos no hacen más que generar mayores inconvenientes, una de ellas es la instalación de sistemas de aire acondicionado, que representa una demanda energética alta y una leve pero no menos importante, emisión de gases contaminantes a la atmosfera.

La ciudad de Bucaramanga a través de los últimos años ha sufrido un aumento de temperatura y una de las principales causas se debe al desarrollo urbanístico; este proyecto busca analizar el fenómeno de las ICU en el centro de la ciudad mediante el uso de un software gratuito dedicado a la modelización del microclima urbano

llamado Envi-met. Este software ofrece una variedad de aplicaciones que incluyen el modelamiento del lugar, recepción de datos meteorológicos y metabólicos y la modificación de la base de datos con el fin de obtener resultados precisos.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Contribuir a la misión y visión de la Universidad Industrial de Santander y de la Escuela de Ingeniería Mecánica, mediante el análisis de islas de calor urbano, generando un aporte a la conciencia ecológica y medioambiental de sus habitantes.

1.2. OBEJTIVOS ESPECÍFICOS

1.2.1. Realizar la construcción virtual del centro de la ciudad de Bucaramanga.

Para lo cual se deberá:

- Realizar un plano del centro de la ciudad teniendo en cuenta las edificaciones, materiales, plantas, tipos de suelos y agentes contaminantes.
- Identificar las condiciones ambientales del centro de la ciudad de Bucaramanga.

1.2.2. Establecer condiciones metabólicas y demográficas de los habitantes

1.2.3. Realizar la simulación de la difusión de contaminantes y distribución de temperaturas del centro de la ciudad de Bucaramanga.

1.2.4. Evaluar el bienestar térmico de los habitantes de en el centro de la ciudad Bucaramanga, en términos de los índices de voto estimado medio (PMV) y el porcentaje estimado de insatisfechos (PPD).

2. METODOLOGÍA

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estudio “Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100” realizado por el IDEAM y las Naciones Unidas, determinó que la temperatura promedio de Colombia podría incrementarse en 2.14°C para el año 2100, ocasionando mayores precipitaciones, sequías, aumento del nivel del mar, deshielo de los nevados, entre otras consecuencias que afectan negativamente el ecosistema del país¹.

Una de las causas de este aumento de temperatura es el crecimiento poblacional y de infraestructura urbana en los últimos años. La creación de nuevas avenidas, puentes, edificios y casas, logran alterar considerablemente el paisaje natural que contribuye con el confort térmico de la ciudad. Las ICU traen consecuencias como malestar humano, aumento del uso de la energía, mayor liberación de gases de efecto invernadero, polución del aire y aumento de los niveles de ozono, convirtiendo este fenómeno en un problema de interés social, ambiental y político.

2.2. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

En el transcurso de la investigación se encontró variada información acerca de la problemática y las diferentes maneras de estudio de la misma, la mayoría usando

¹ IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. 2015. Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011- 2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático

información satelital para definir zonas con concentraciones de mayor temperatura², mientras que, por otra parte, el uso de software es algo que hasta ahora se está implementando. Se evidenció también, que España es uno de los países que ha desarrollado un gran número de investigaciones de este tipo analizando el efecto negativo que tiene este problema sobre la población³.

2.3. MARCO TEÓRICO

2.3.1. Microclima urbano.

La diferencia de condiciones microclimáticas de los espacios urbanos frente a las zonas rurales, es una de las consecuencias producida por el conjunto construido constituido por edificios, calles y superficies pavimentadas. De esta manera la ciudad actúa como un factor modificador importante del clima local, creando condiciones medioambientales concretas que se pueden definir en términos de comparación con su entorno rural y a partir de estas diferencias entre ambos se puede caracterizar el comportamiento de la ciudad. Aunque, cada ciudad conserve las condiciones climáticas características de la región en que se asienta, en una misma ciudad se encuentra una gran diversidad de matices como consecuencia de la heterogeneidad en la morfología y estructura de los espacios construidos, que lleva a un análisis a escala local que corresponde a pequeños espacios y edificios⁴.

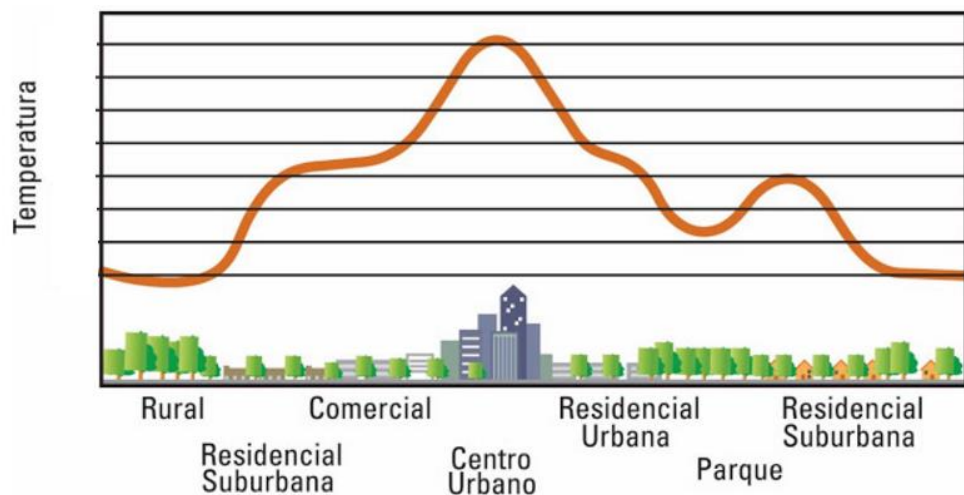
² PRECIADO VARGAS, Mónica. ALDANE OLAVE, Armando. Análisis de presencia de islas de calor en Santiago de Cali empleando técnicas de teledetección. En : Ventana Informática. No. 24 (enero-junio de 2011). pp 95-144.

³ J. M. CUADRAT PRAT⁵, J. DE LA RIVA, F. LÓPEZ Y A. MARTÍ. El medio ambiente urbano en Zaragoza. Observaciones sobre la «isla de calor». En : Anales de Geografía de la Universidad Coenplueense. No. 13, 127-138 Ed, 1993.

⁴ TUMINI, Irina. Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrid: sesión 7. En: Congreso Internacional "Edificación sostenible, revitalización y rehabilitación de barrios" (1° : 2010 : Madrid). Ponencias del Congreso SB10mad. Edificación sostenible, Revitalización y Rehabilitación de barrios.

Los rasgos más sobresalientes del microclima urbano se manifiestan en un aumento de la temperatura, en la reducción de la amplitud térmica diaria⁵, en una peculiar distribución de los vientos de la ciudad, consecuencia del rozamiento con los edificios y encauzamiento en las avenidas, y en un balance hídrico diferente al existente en los espacios rurales.

Figura 1. Perfil de una isla de calor urbana.



Fuente: El aula de historia [en línea] [citado marzo de 2016]
<http://elauladehistoria.blogspot.com.co/2016/01/microclima-urbano-la-ciudad-una-isla-de.html>.

La Figura 1 muestra el comportamiento de la temperatura en una misma ciudad con respecto a las diferentes zonas que se pueden encontrar. En ella se evidencia la

⁵ Amplitud térmica: es la diferencia numérica entre los valores máximos y mínimos de temperatura observado en un punto dado durante un período de tiempo.

diferencia de temperatura entre la zona urbana y la rural o toda aquella que tenga mayor presencia de naturaleza y menor masa de concreto.

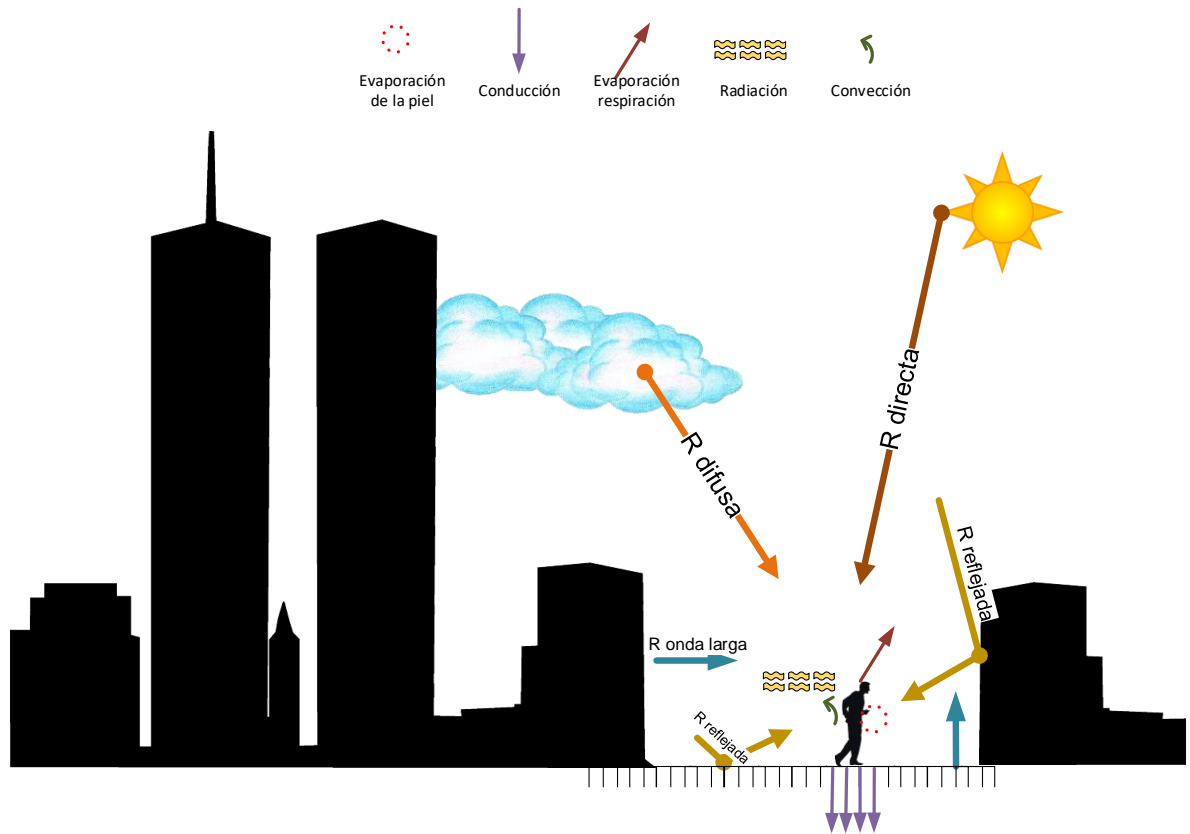
2.3.2. Confort térmico urbano.

La conformación de la ciudad tiene repercusiones térmicas tanto en el interior de las edificaciones como en el espacio público. El comportamiento térmico de los emplazamientos está definido por el balance de energía. Este balance es resultado de la transferencia de calor por conducción, convección y radiación entre los elementos que componen el contexto urbano: pavimentos, fachadas, vegetación y cuerpos de agua principalmente. Las personas también intervienen en este balance y mantienen un continuo intercambio de calor con el ambiente. Es por ello que una persona podrá mantenerse en un sitio con unas determinadas condiciones de confort dependiendo del tipo de superficies que le rodeen y las condiciones espaciales en las que se encuentre. La metodología empleada en el análisis de confort térmico en espacios urbanos tiene por objetivo reconocer principalmente el potencial de confort de un espacio a partir de las condiciones climáticas, las características metabólicas de los habitantes y los materiales, en especial por la presencia de vegetación. Esto se debe a que, para planificar un espacio público térmicamente confortable, es necesario integrar el diseño de las secciones de calle con el tipo de materiales en pavimentos y el volumen verde necesario⁶.

La sensación de confort está ligada directamente al intercambio de calor de una persona con los objetos de su alrededor. La figura 2 muestra los diferentes tipos de intercambio de calor que se pueden presentar en una zona urbana común.

⁶ GASTEIZ, Vitoria. Estudio de movilidad y espacio público. Anexo: Metodología confort térmico. [en línea]. <<http://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/http/contenidosEstaticos/adjuntos/es/39/61/23961.pdf>>. [Citado en 6 de agosto de 2016]

Figura 2. Intercambio de energía entre el ser humano y su entorno.



El intercambio de calor por convección ocurre por la circulación del aire alrededor del cuerpo humano. Con respecto a los intercambios por radiación, estos dependerán de las temperaturas del cuerpo humano y de las temperaturas de las superficies adyacentes, ya que éstas irradian calor dependiendo principalmente de las características térmicas de sus materiales y de la radiación solar recibida. En condiciones exteriores el intercambio radiante del cuerpo humano con el ambiente tiene especial importancia debido a la exposición a la radiación solar, la fría bóveda celeste y las cálidas y frías superficies urbanas.

Los intercambios de calor por conducción se producen por la transmisión de calor entre la superficie del cuerpo y los elementos de contacto, depende de la diferencia de temperatura entre las superficies de los cuerpos en contacto y de la

conductividad térmica del material en contacto. Finalmente, el intercambio de energía por evaporación se refiere a la transmisión de calor del organismo hacia el ambiente a través de la evaporación cutánea y respiratoria.

Todos estos procesos mencionados dependen de una serie de factores y parámetros, los primeros se refieren a características propias de las personas como la vestimenta, actividad física, edad, sexo, grado de aclimatación y los segundos se relacionan con el microclima del ambiente urbano donde se encuentran éstas personas, el cual está caracterizado por sus condiciones de temperatura, humedad relativa, velocidad del aire y la temperatura radiante⁷.

2.3.3. Evaluación del confort térmico.

El método de cálculo se basa en el modelo de Fanger y a diferencia de los modelos de confort en espacios interiores, da un tratamiento especial a las condiciones exteriores. El balance de confort se calcula de la siguiente manera⁸:

$$Q = (M + R_{abs} - R_{emit} - C - E)$$

- Calor Metabólico liberado (actividad metabólica) *M*: Calor producido por el cuerpo debido a la realización de un trabajo. Así, si el individuo realiza un trabajo más intenso será mayor el calor metabólico y serán mayores los esfuerzos del cuerpo por eliminar el calor en exceso acumulado. En este sentido las actividades para el espacio público se pueden clasificar en actividades ligeras, de paseo o intensas.

⁷ CORDERO ORDÓÑEZ, Ximena. Microclima y confort térmico urbano: Análisis sobre la influencia de la morfología del cañón urbano caso de estudio en los barrios el rival y gracia, Barcelona. Barcelona, 2014, 1-110 pp. Trabajo de grado (Master en arquitectura, energía y medio ambiente). Escuela técnica superior de arquitectura de Barcelona.

⁸ GASTEIZ, Op. cit.

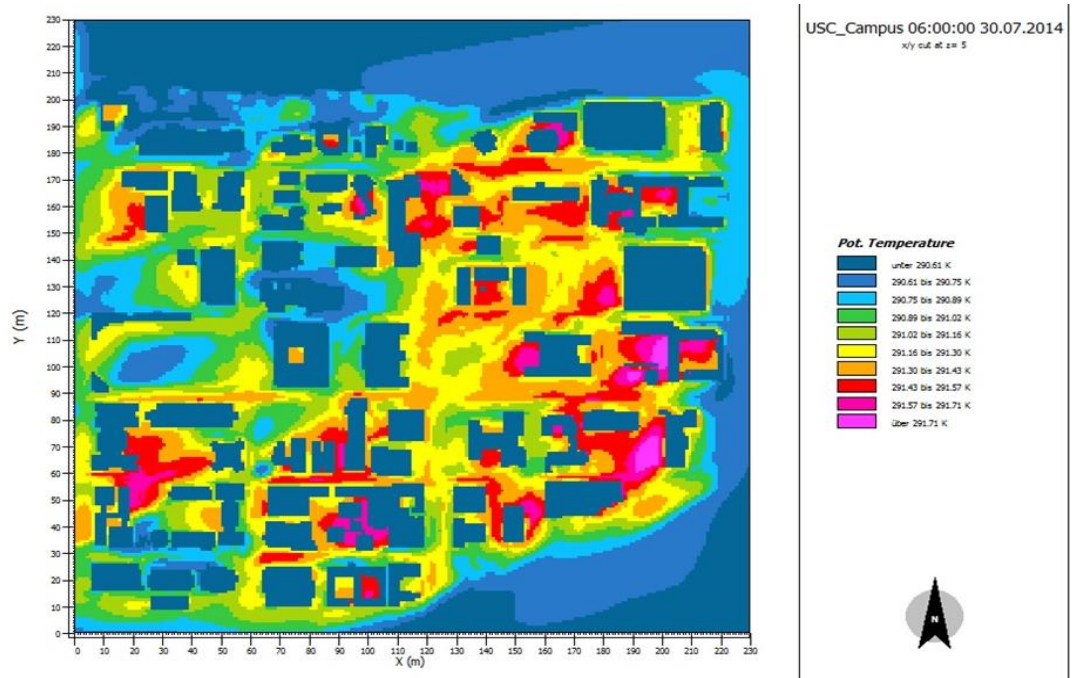
- Calor sensible perdido o ganado por convección C : Esta dado por la cantidad de energía perdida o ganada por efectos del viento.
- Calor perdido por evaporación E : El calor liberado por evaporación corresponde al calor latente producido por la transpiración del organismo.
- Radiación solar absorbida R_{abs} : La cantidad de radiación absorbida por una persona corresponde a la suma de la radiación directa, difusa y reflejada que absorbe dependiendo del albedo de la misma.
- Radiación terrestre emitida (infra roja) R_{emit} : Corresponde a la cantidad de radiación infra roja que recibe de la emisión de las superficies alrededor, radiación difusa y terrestre sumada a la emitida por la persona como un cuerpo negro, cuya absortividad es de 1.

2.3.4. Envi-met.

Envi-met es un modelo tridimensional integral para la simulación de las interacciones entre plantas, aire y superficies. Se usa a menudo para la simulación de entornos urbanos y para evaluar los efectos de la arquitectura verde. Está diseñado con una resolución horizontal típica de 0.5 a 10 m y un marco de tiempo de 24 a 48 horas con un paso del tiempo de 1 a 5 segundos. Esta resolución permite analizar las interacciones a pequeña escala entre los edificios, superficies y plantas.

El mapa térmico en de la figura 3 muestra la distribución de temperaturas en el campus de la Universidad del Sur de California (USC), obtenida mediante una simulación con el Software.

Figura 3. Variación del microclima en el campus de la Universidad del Sur de California.



Fuente: Tomado de: <http://spatial.usc.edu/index.php/speaking-spatially-salon-showcases-studies/>

El modelo de cálculo de este software incluye⁹:

- Flujos de radiación de onda corta y larga con respecto a la sombra, radiación reflejada por los edificios y vegetación del sistema.
- Transpiración, evaporación y flujo de calor sensible de la vegetación en el aire, incluye una simulación completa de todos los parámetros físicos de la planta (ejemplo la fotosíntesis).

⁹ ENVI-met. ENVI-met 4: A holistic Microclimate Modelling System. [en línea]. < <http://www.envi-met.info/hg2e/doku.php?id=root:start> > [citado 10 de agosto de 2016]

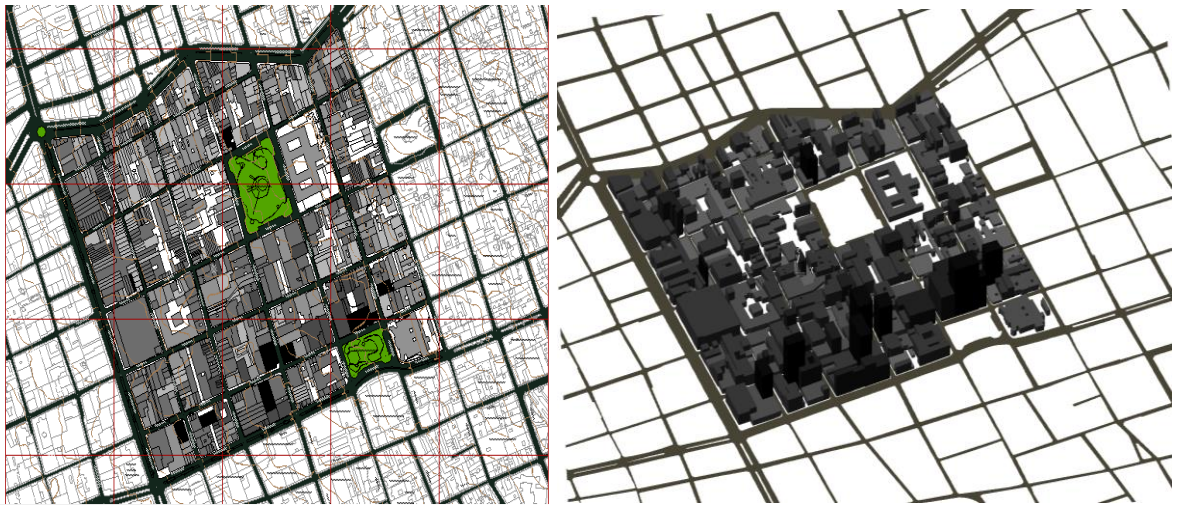
- Cálculo de la temperatura dinámica de las superficies, soporta hasta 3 capas de materiales y 7 puntos de cálculo en cada pared o techo.
- Intercambio de calor en el interior del suelo, incluyendo la captación de agua de las plantas.
- Dispersión de gases y partículas. El modelo incluye la sedimentación y deposición en las hojas y superficies, gases inertes y los gases reactivos del ciclo de reacción de NO-NO₂-ozono.
- Cálculo de índices biometeorológicos, temperatura radiante media y PMV/PPD.

2.4. RECOLECCIÓN DE DATOS

2.4.1. Datos arquitectónicos.

El sector de estudio de este proyecto está comprendido desde la carrera 15 hasta la carrera 21, entre calle 36 y Avenida Quebrada Seca de la ciudad de Bucaramanga. Los datos arquitectónicos requeridos son: La distribución de la zona, alturas de los edificios, ubicación de parques y distribución de árboles en las diferentes calles. La mayor parte de estos datos fueron proporcionados por el arquitecto Fabián Andrés Vargas Mantilla a través de su proyecto de pregrado “Renovación Urbana en la Ciudad de Bucaramanga (Sector centro)”.

Figura 4. Plano y vista en 3D de la zona de estudio.



Con la información contenida en el proyecto se conoció que la orientación del sector es de 22° Noreste, con un ancho de 620 metros y una longitud de 633 metros aproximadamente. Las alturas de los edificios van desde los 3 hasta los 54 metros los cuales están distribuidos en 30 manzanas. También, se encontró que el sector cuenta con dos parques: El parque Santander ubicado sobre la calle 36 entre carreras 19 y 20 y el parque Centenario ubicado entre carreras 18 y 19 con calles 32 y 33.

Por otra parte, para la distribución de árboles sobre las vías se realizó un recorrido por las calles del sector usando Google Street View, exceptuando la carrera 15 de la cual no hay registro, por tal motivo para este tramo se hizo un recorrido a pie.

2.4.2. Datos meteorológicos.

En el desarrollo de este proyecto es fundamental conocer características microclimáticas propias del sector. Por tanto, se instaló una estación meteorológica portátil en la terraza del edificio Turbay, ubicado en la carrera 16 con calle 35, para así obtener datos como: Temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento (Ver anexo A).

Figura 5. Estación meteorológica portátil ubicada en la terraza del edificio Turbay.

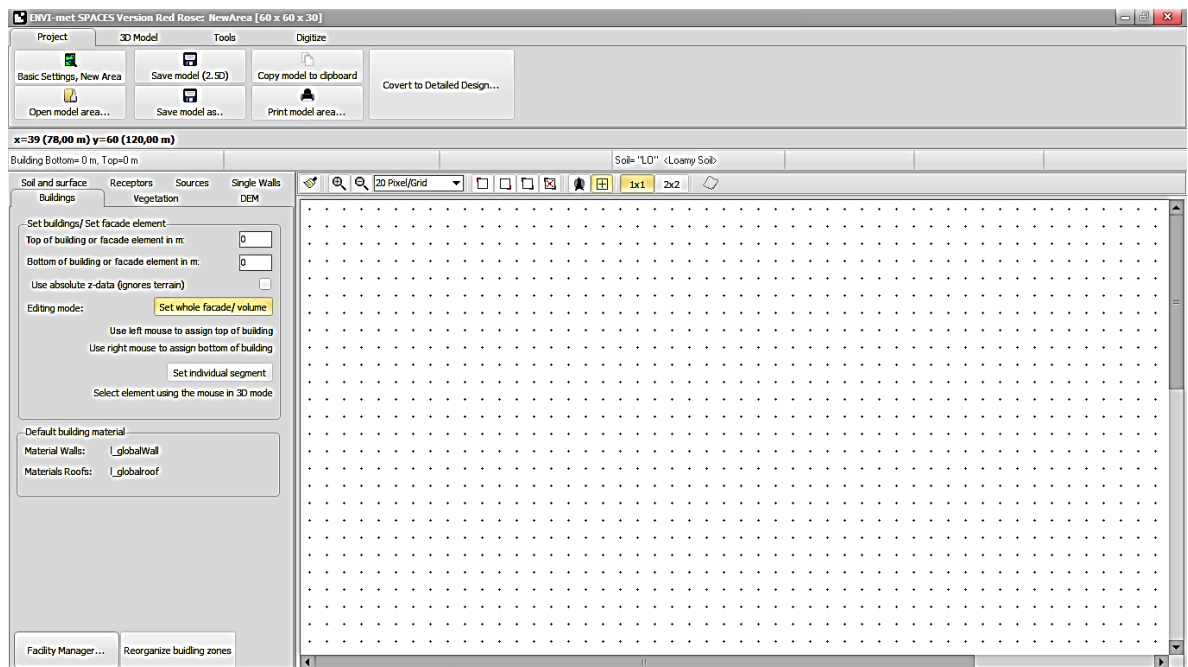


3. MODELAMIENTO

El desarrollo del modelo virtual del centro de la ciudad se realizó en el módulo “Space” del programa Envi-met, el cual se puede ver en la siguiente figura. Esta sección del software permite determinar los principales parámetros físicos de la zona de estudio como: Ubicación, tipos de suelos, materiales, geometría, vegetación, entre otros.

Cada uno de los aspectos de modelación que se desarrollaron en este módulo se explica con mayor detenimiento a continuación.

Figura 6. Módulo “Space” de Envi-met



3.1. ESPACIO

El primer paso en la modelación es la configuración del espacio de trabajo. La figura 7 muestra la ventana de trabajo en la cual se ingresaron los datos geométricos de la tabla 1 y los datos geográficos de la tabla 2.

Cabe resaltar que el programa puede manejar un volumen máximo de 250X250X30 y por tanto el espacio de trabajo debe dividirse en partes diferenciales dx, dy y dz, con el fin de poder modelar el sector completo.

Figura 7. Ventana de ajustes generales del modelo.

The screenshot shows a dialog box titled "Change or create model Domain" with a close button (X) in the top right corner. The dialog is organized into several sections:

- Number of grids and nesting properties:**
 - Model type:** Concept Design
 - Main model area:** x-Grids: 207, y-Grids: 211, z-Grids: 25
 - Nesting grids around main area:** Nr of nesting grids: 0
 - Set soil profiles for nesting grids:** Soil A: [00] Default Unsealed Soil (" do no, Soil B: [00] Default Unsealed Soil (" do nc
- Grid size and structure in main area:**
 - Size of grid cell in meter:** dx= 3.00, dy= 3.00, dz= 6.00 (base height)
 - Method of vertical grid generation:**
 - equidistant (all dz are equal except lowest grid box)
 - telescoping (dz increases with height)
 - Telescoping factor (%): 0.00
 - Start telescoping after height (m): 0.00
- Default Wall/ Roof Properties:**
 - Wall Material:** [00] Concrete slab (hollow block,
 - Roof Material:** [00] Concrete slab (hollow block,
- Model area description:** Centro de Bucaramanga
- Geographic Properties:**
 - Model rotation out of grid north:** -22.00
 - Location on earth:** Name of location: bogota/Columbia
 - Position on earth:** Latitude (deg, +N, -S): 7.13, Longitude (deg, -W, +E): -73.13
 - Reference time zone:** Name: EST/GMT-5, Reference longitude: -75.00
 - Georeference:** Co-ordiante of lower left grid: x-value: 0.00, y-value: 0.00
 - Reference system: <plane>
 - Reference level above sea level for DEM=0: 0.00

Buttons on the right side: "Create new area", "Apply changes", "Cancel".

Tabla 1. Datos geométricos.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Numero de volúmenes de control en el eje X	207	Unidades
Numero de volúmenes de control en el eje Y	211	Unidades
Numero de volúmenes de control en el eje Z	25	Unidades
Tamaño del volumen de control en el eje X (dx)	3	Metros
Tamaño del volumen de control en el eje Y (dy)	3	Metros
Tamaño del volumen de control en el eje Z (dz)	6	Metros

Al realizar la distribución geométrica de esta manera se logró crear un ancho de 621 metros (eje X), una profundidad de 633 metros (eje Y) y una altura máxima de 150 metros (eje Z). Así mismo, se pudo cubrir todo el volumen de trabajo requerido sin sobrepasar los límites del software.

Tabla 2. Datos geográficos.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Rotación del modelo	-22° Norte
Lugar	Bogotá/Colombia
Latitud	7.13° Norte
Longitud	-73.13 Oeste

Tal como se mencionó anteriormente, el sector de estudio no está en la dirección del norte, por lo tanto, fue necesario ajustar el modelo con una rotación del mismo de tal manera que quede en la orientación real. Para este caso el modelo se roto 22° negativos en dirección norte.

Por otra parte, se escogió Bogotá como el lugar de estudio ya que era la única ciudad de Colombia en la lista del software. Sin embargo, los valores de latitud y longitud son propios de la ciudad de Bucaramanga.

3.2. SUELOS

Envi-met ofrece una pequeña variedad de suelos clasificados en 5 categorías: Decorativos, naturales, carreteras, especiales y otros. Cada suelo presenta características específicas; una de ellas es el albedo, el cual hace referencia a la cantidad de radiación solar que es devuelta a la atmosfera tras chocar con una superficie. Esta es una característica propia del material que influye directamente en la temperatura del sector. Por tanto, la selección de suelos se realizó con base en estudios que caracterizan dicha propiedad¹⁰.

La tabla 3 permite conocer los tipos de suelos que se usaron en el diseño del modelo; mostrando los valores para las características de mayor importancia en el cálculo del software.

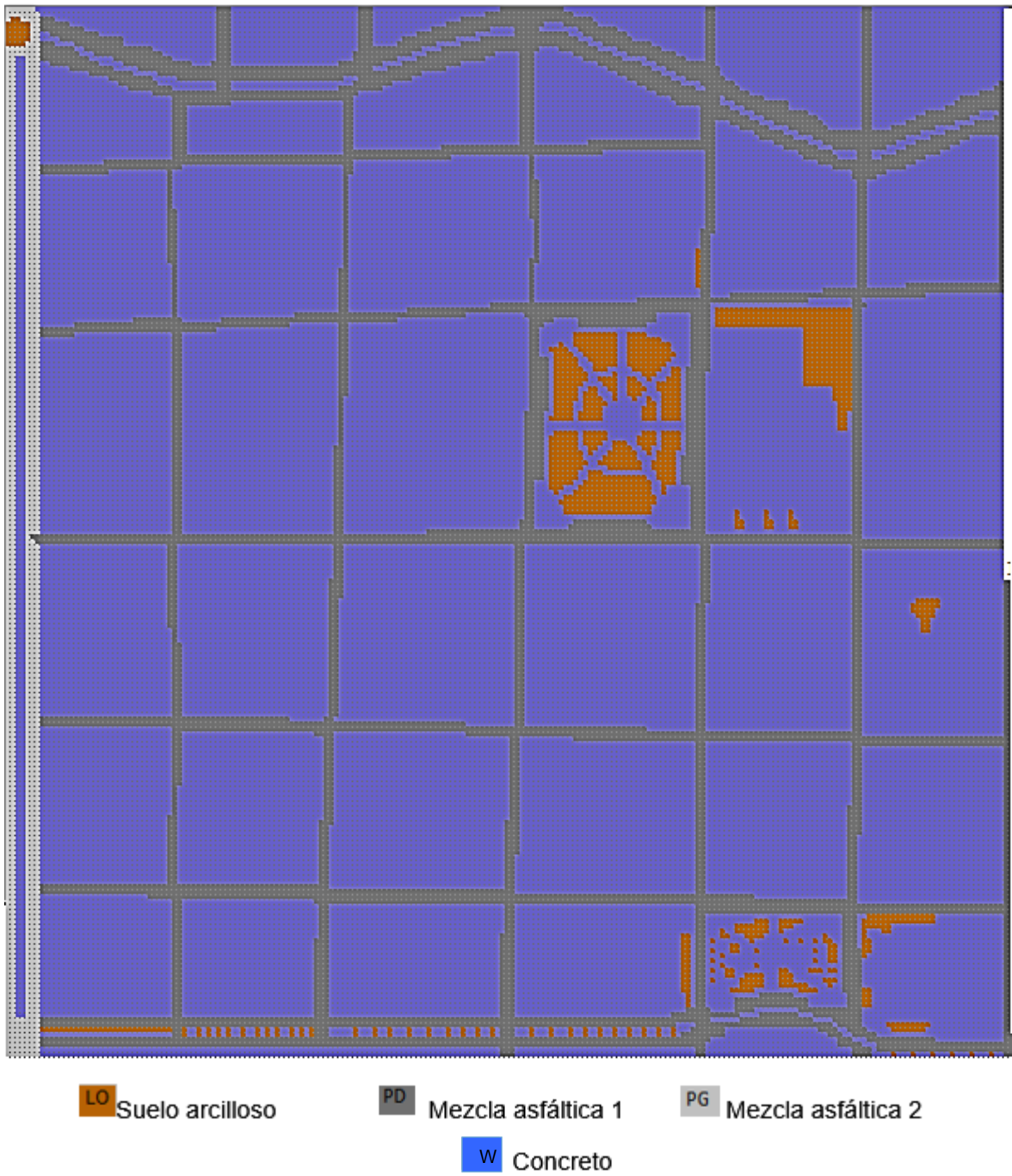
¹⁰ GOYAL, Megh y RAMIREZ, Víctor. Elementos de agroclimatología: Distribución de la radiación solar en la atmosfera. Risaralda : UNISARC. 307 p.

Tabla 3. Tipos de suelos identificados.

TIPO DE SUELO	ALBEDO	ESPESOR DE RUGOSIDAD [m]	EMISIVIDAD	USO
Arcilloso	0	0.015	0.98	Zonas verdes
Mezcla asfáltica de concreto 1	0.2	0.01	0.90	Calles del sector
Mezcla asfáltica de concreto 2	0.5	0.01	0.90	Carril exclusivo de Metrolinea.
Concreto	0.4	0.01	0.90	Base de edificación y andenes.

La figura 8 visualiza la distribución final de suelos en todo el modelo, en ella se puede diferenciar cada uno de estos de acuerdo con un color de referencia. En el sector se encuentra concreto y asfalto debido para las edificaciones y vías, las cuales abarcan gran parte de la zona de estudio, dejando así, poco espacio para los suelos arenosos en los cuales se encuentra la vegetación.

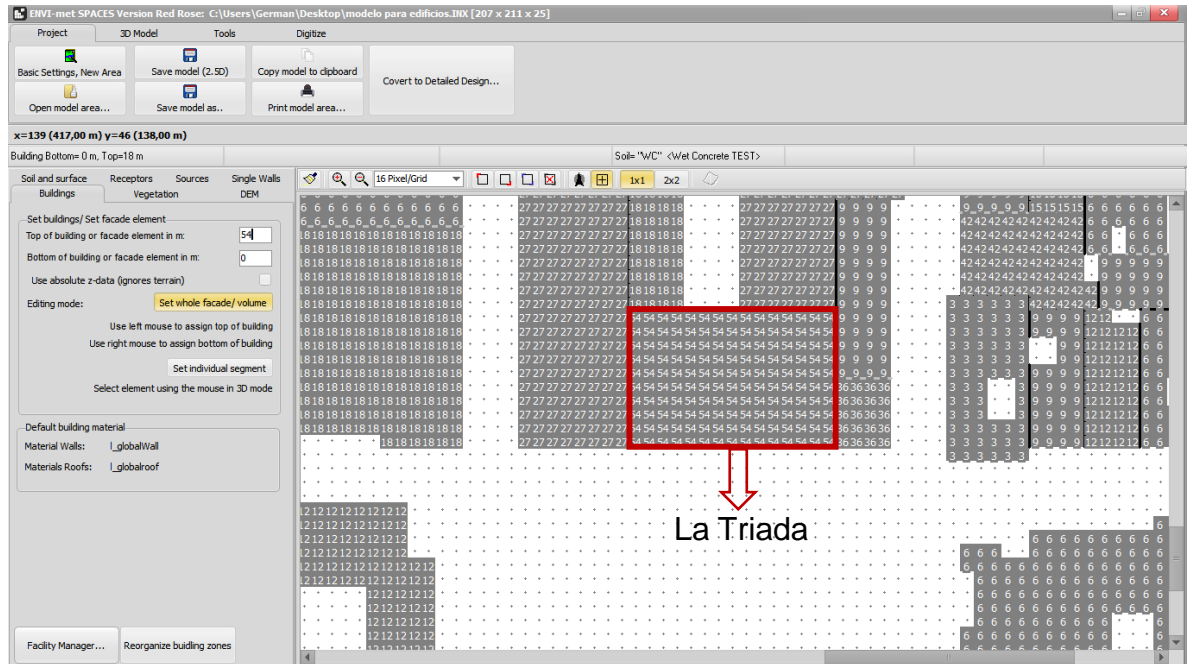
Figura 8. Plano de distribución de suelos en el sector.



3.3. EDIFICIOS

Para modelar las edificaciones fue necesario asignar celda a celda la altura del edificio en ese punto. Por ejemplo, para el edificio La Triada, el cual tiene un área de 1320 metros cuadrados y una altura de 54 metros, fue necesario ubicar 150 cuadrados con una altura de 54 metros y un área de 9 metros cuadrados cada uno, como se visualiza en figura 9.

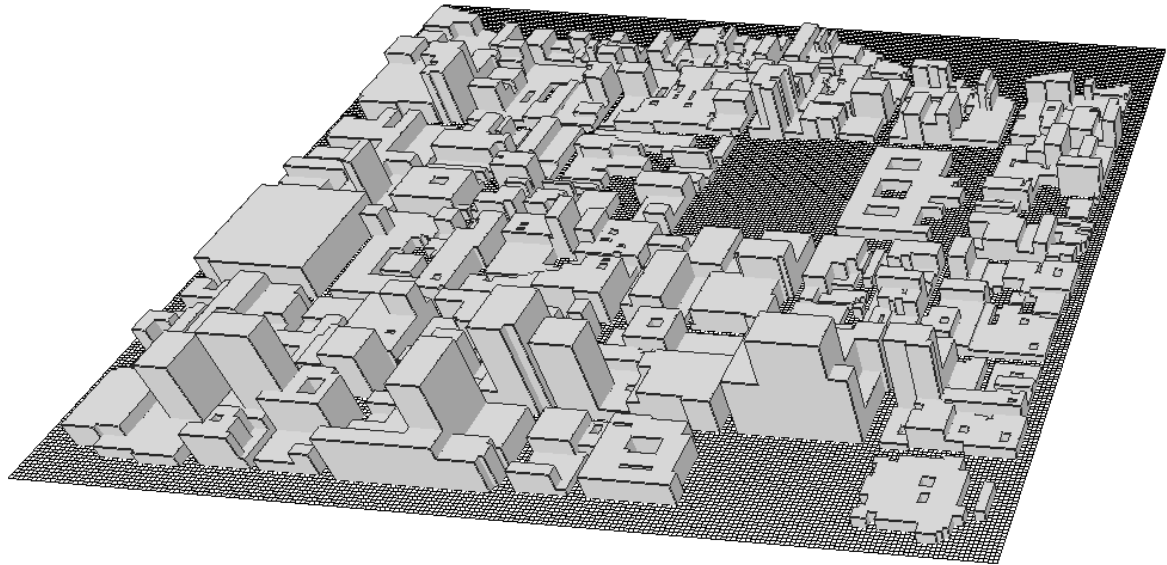
Figura 9. Muestra del plano de edificaciones en la ventana "Space"



De la misma manera se realizó el modelamiento para las más de 500 edificaciones que se encuentran en el sector.

En la figura 10 se puede ver un modelo en 3D con todos los edificios del centro de la ciudad de Bucaramanga.

Figura 10. Modelo en 3D de edificaciones en el centro de Bucaramanga.



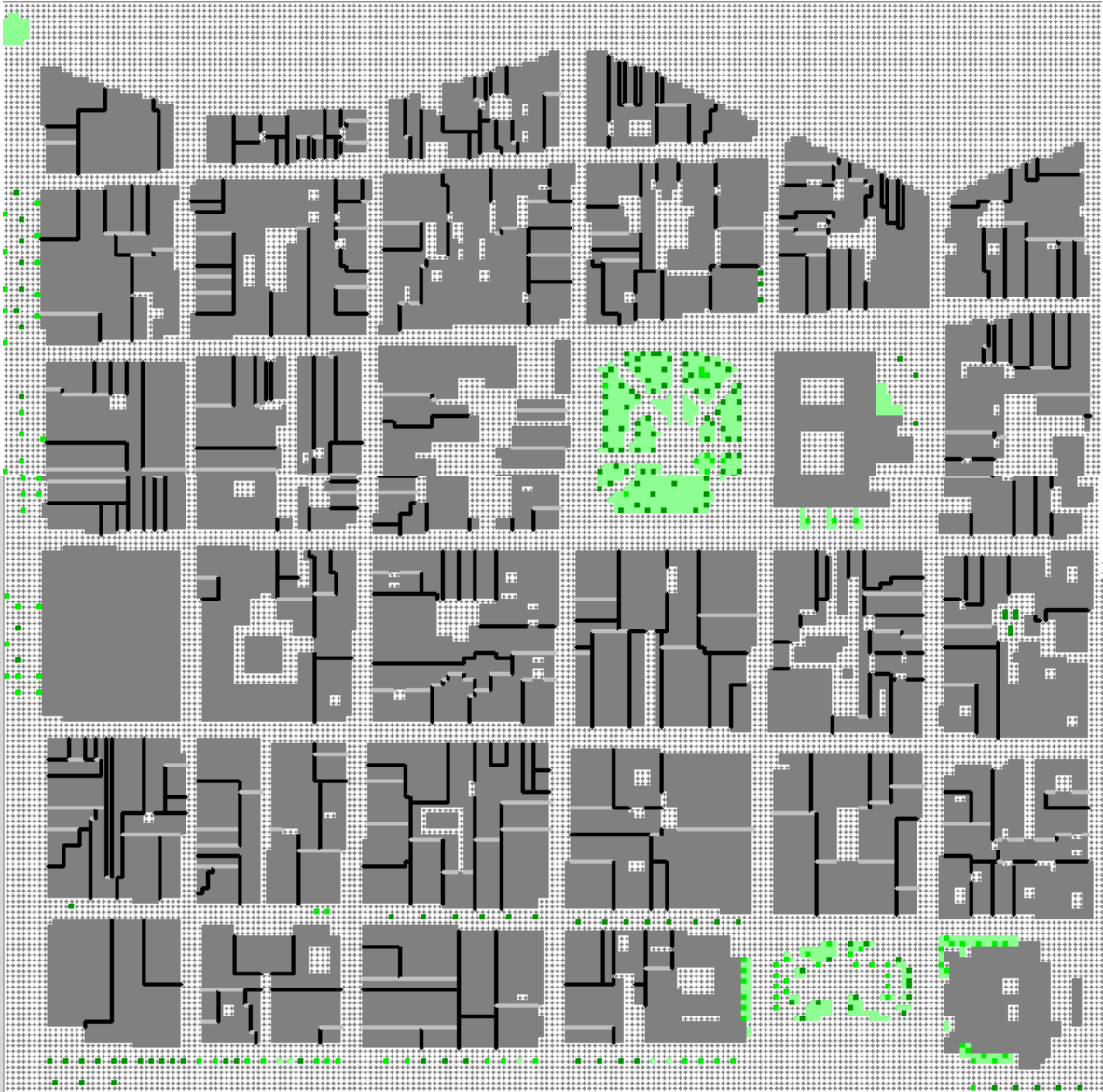
3.4. VEGETACIÓN

Dentro de la vegetación no solo se tuvo en cuenta los parques, sino que además se ubicó cada uno de los árboles que hay en el sector, en vista de la importancia que representan en el microclima urbano. Algunos de estos se encontraron en las principales vías, calles peatonales y algunas edificaciones que tienen antejardín o zonas verdes en su fachada.

Aunque Envi-met ofrece diferentes tipos de árboles predeterminados en 3D, ninguno de ellos se ajustó a la realidad debido a su gran tamaño, por lo tanto, fue necesario usar vegetación simple, en la cual hay pasto de 50 centímetros de altura y árboles que van desde los 10 a 25 metros de altura variando su densidad. Los más usados en este proyecto fueron los árboles de 10 y 15 metros de poca

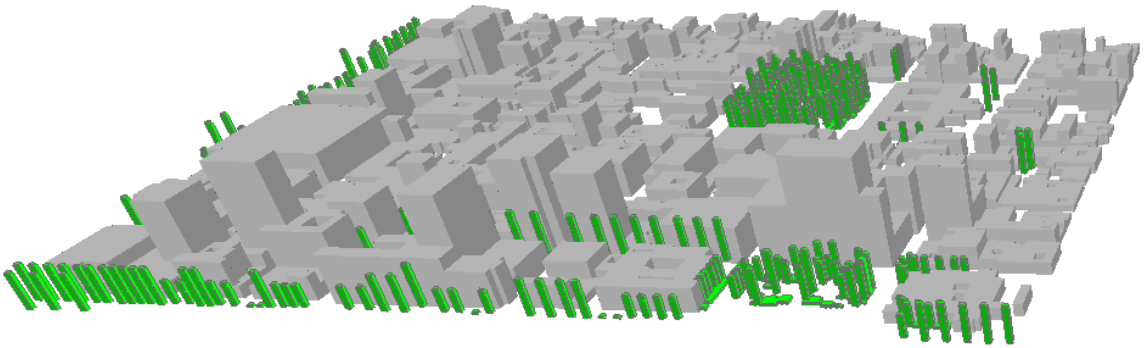
densidad, el de 20 metros con mayor densidad y el pasto o césped de 50 centímetros.

Figura 11. Distribución de la vegetación en el sector.



La vegetación simple de Envi-met está restringida a figuras cuboides tal como se puede ver en la figura 12. Sin embargo, los procesos naturales de las plantas se desarrollan de manera adecuada como un árbol o planta normal.

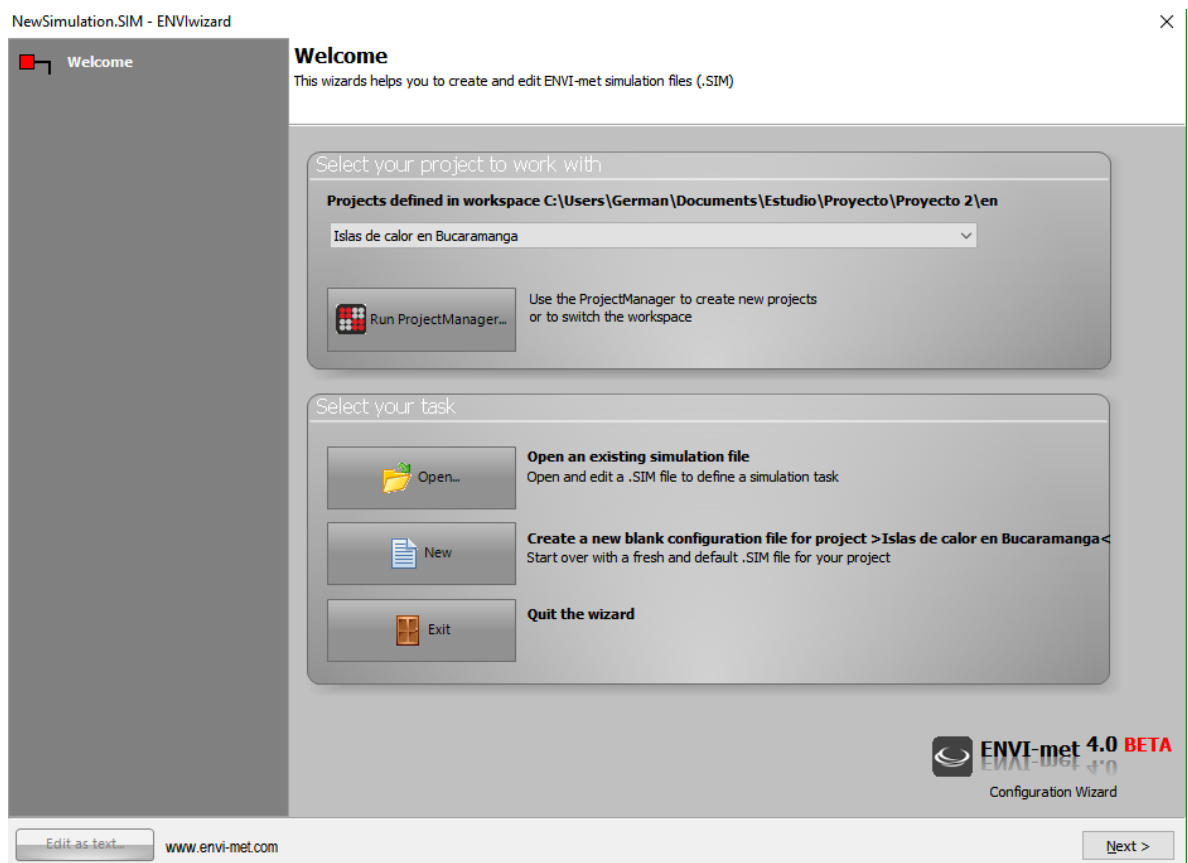
Figura 12. Modelo en 3D con la vegetación presente en el sector.



4. CONFIGURACIÓN

El módulo “ConfigWizard” del software Envi-met permite realizar la configuración del modelo mediante pasos detallados, en los cuales pide al usuario suministrar información meteorológica, geográfica, seleccionar parámetros de simulación e incluso brinda la posibilidad de modificar propiedades avanzadas de programación.

Figura 13. Ventana principal del módulo "ConfigWizard"



4.1. AREA

En el primer paso para la configuración del modelo, se seleccionó el archivo que contiene el área de trabajo desarrollada en el numeral 2. La figura 14 muestra como el módulo da una visualización previa de dicha área, permitiendo así comprobar que el diseño anexado sea el adecuado.

Figura 14. Ventana "Area Input file" del módulo "ConfigWizard"



Una vez realizado este paso, el siguiente fue asignar un nombre a la simulación. En este caso se le llamó "Islas de calor".

4.2. TIEMPOS Y FECHA

Tal como se puede ver en la figura 15, en este espacio se introduce la fecha en que se desea realizar la simulación, las horas por simular y los intervalos de salida de los resultados. El día escogido para la simulación fue el 9 de Julio del año 2016; uno de los días en los cuales la estación meteorológica portátil estuvo instalada en la terraza del edificio Turbay.

La simulación se realizó en el máximo lapso de tiempo permitido por el software, es decir, 48 horas. Finalmente, se determinó que el intervalo de tiempo para la salida de resultados fuese de 60 minutos con el fin de estudiar los cambios de temperatura hora a hora.

Figura 15. Ventana "Time and Date, Output" del módulo "ConfigWizard"

NewSimulation.SIM - ENVl wizard

Time and Date, Output
Define date and length of simulation and output options

Start and duration of model run

Start Date (DD.MM.YYYY): 09.07.2016

Start Time (HH:MM:SS): 00:00:00

Total Simulation Time (h): 24

Output settings

Output interval for files

Receptors and buildings (min): 30

All other files (min): 60 Include Nesting cells in output files

Edit as text... www.envi-met.com < Back Next >

4.3. DATOS METEOROLÓGICOS

4.3.1. Datos básicos.

En esta sección el software solicita información meteorológica básica del sector. Para ello se utilizó la información recopilada por la estación meteorológica portátil (Ver anexo A).

Tabla 4. Datos meteorológicos básicos.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Velocidad del viento	1.997	m/s
Dirección del viento	22.5	Deg
Longitud de la rugosidad del sitio	0.1	cm
Humedad absoluta	15.5	g/Kg
Humedad relativa	76.5	%

En vista de que el programa solicita un único dato por día y la información recopilada por la estación meteorológica es de 150 datos por día aproximadamente, fue necesario obtener un valor promedio para cada una de las variables de la tabla 4 exceptuando la longitud de rugosidad.

La longitud de rugosidad hace referencia a la altura (de acuerdo a la superficie que este en contacto) en la cual la velocidad del viento se hace cero teóricamente. Para este proyecto se tomó el valor de 0.1 [cm], ya que era el mayor valor permisible y

diferentes estudios demuestran que para la calle de una ciudad con muchas edificaciones el valor de este parámetro esta entre 0,5 a 0,8 [cm]¹¹.

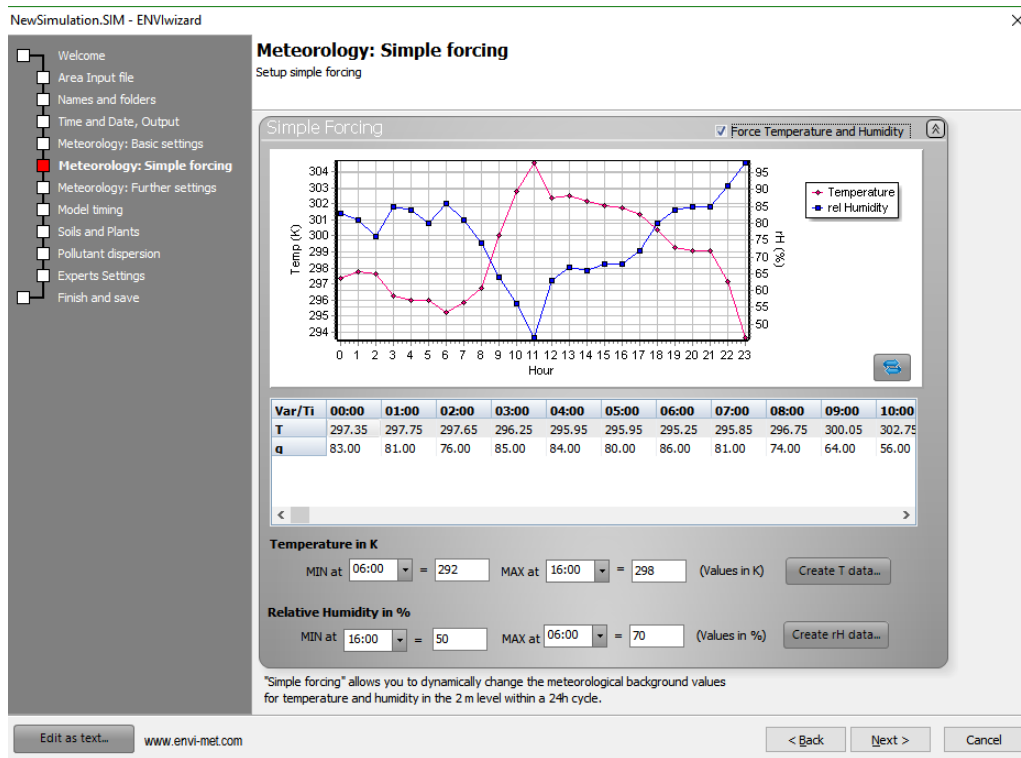
4.3.2. Datos meteorológicos específicos.

Después de haber introducido los datos meteorológicos básicos, el software pide al usuario administrar la información específica de la temperatura y humedad relativa hora a hora respectivamente, durante las 24 horas referentes al primer día en que se desea realizar la simulación.

Para ello hay dos maneras de realizarlo. La primera es suministrar únicamente los valores máximos y mínimos determinando respectivamente la hora en que estos se dieron; de esta manera el software hará una regresión para asignar valores de temperatura y humedad en cada una de las horas. La segunda opción consiste en introducir uno a uno los valores de temperatura y humedad durante las 24 horas. Para este proyecto se usó la segunda opción gracias a los datos obtenidos mediante la estación meteorológica.

¹¹ HANSEN, Frank. SURFACE ROUGHNESS LENGTHS. New York : ARL-TR-61, 1993. 51 p.

Figura 16. Datos meteorológicos específicos.



Una vez se insertan los valores, el programa visualiza una gráfica de temperatura y humedad relativa versus el tiempo en horas, tal como se ve en la figura16. Esto permite una mayor comprensión del comportamiento meteorológico del sector.

4.3.3. Más ajustes meteorológicos.

El factor de radiación, la nubosidad, el modelo de turbulencia y las condiciones de contorno son aspectos para los cuales el software permite una pequeña modificación.

El factor de radiación es un valor de 0 a 1, que modifica la radiación calculada. Para este proyecto se dejó el valor de 1 con el fin de no alterar dicho cálculo y validarlo posteriormente.

En cuanto a la nubosidad, no se modificó y se dejó que el software la calculara, ya que Envi-met solo permite insertar un valor para cada tipo de nubosidad (baja, media y alta), manteniéndolos constantes durante las 24 horas de la simulación; lo cual no es adecuado ni realista.

Por otra parte, el modelo de turbulencia usado por Envi-met se fundamenta en un sistema que comprende las ecuaciones diferenciales de la energía cinética turbulenta (k) y la disipación de la energía cinética turbulenta (ϵ), donde la primera describe la cinética de la energía del aire, y depende de la producción, advección¹², difusión y destrucción; mientras que la segunda describe el rango de disipación TKE estándar¹³.

Finalmente, las opciones de condiciones de contorno proporcionadas por Envi-met son: abierto, cerrado y cíclico¹⁴. Para este proyecto se escogieron las opciones abierto para la temperatura y humedad y cíclico para las condiciones de frontera referentes a la turbulencia. Esta decisión se basó en un proceso iterativo de simulaciones en el que se analizaron las inestabilidades de los resultados, siendo este arreglo el de mejores resultados.

4.4. TIEMPO DE MODELAMIENTO.

La opción de tiempo de modelamiento mostrada en la figura 17, permite la configuración manual de los pasos de modelación, y el tiempo de actualización de los procesos de las plantas, superficie, radiación, sombras y flujo de viento. Todos estos parámetros se dejaron con los valores predeterminados ya que el programa

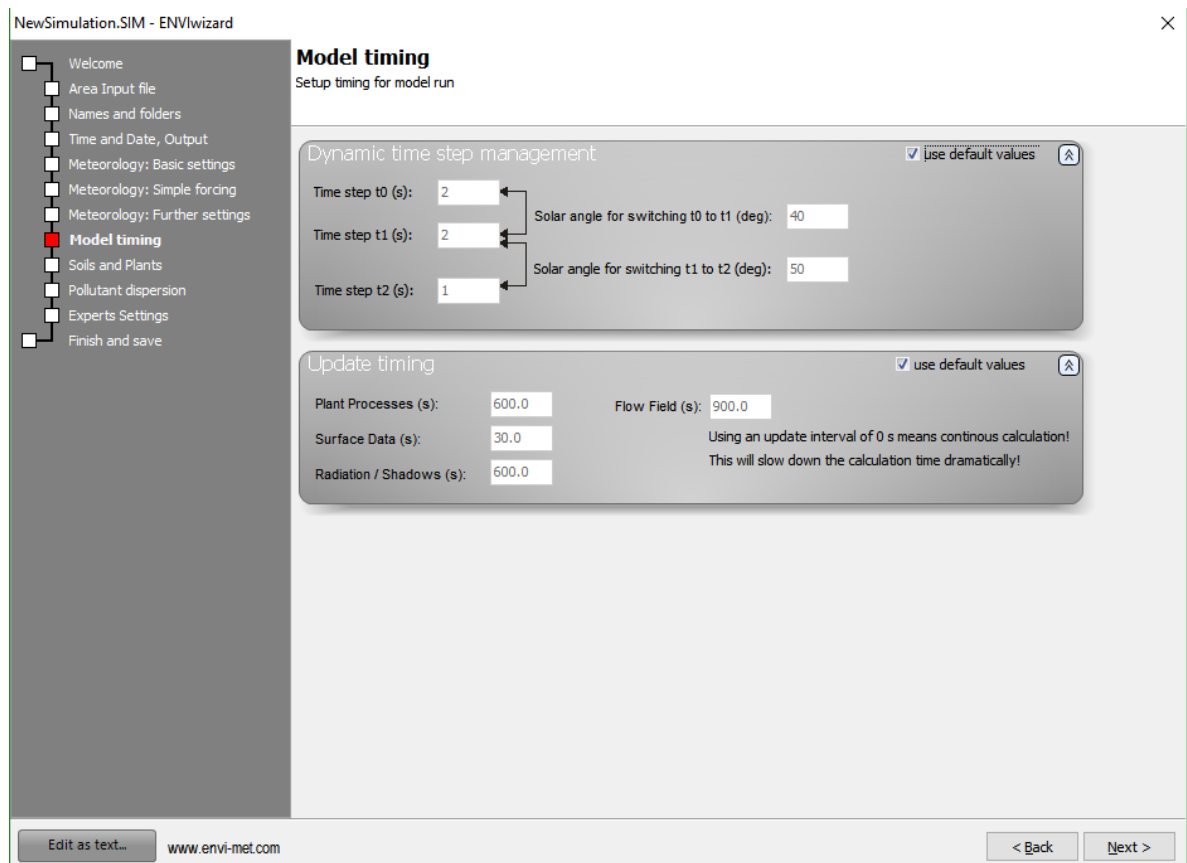
¹² Advección: Es el proceso de transporte de una propiedad atmosférica por el campo de masa, lo cual, en la meteorología típicamente se evalúa utilizando el viento total

¹³ENVI-met. ENVI-met 3.1 Manual Contents. [en línea]. <<http://www.envi-met.com/documents/onlinehelpv3/helpindex.htm> [citado 18 de agosto de 2016]

¹⁴ Ibid.

advierte que la modificación de ellos puede generar inestabilidades en el proceso y además la disminución de los tiempos de actualización implicaría mayores demoras en proceso de simulación.

Figura 17. Tiempos de modelado.

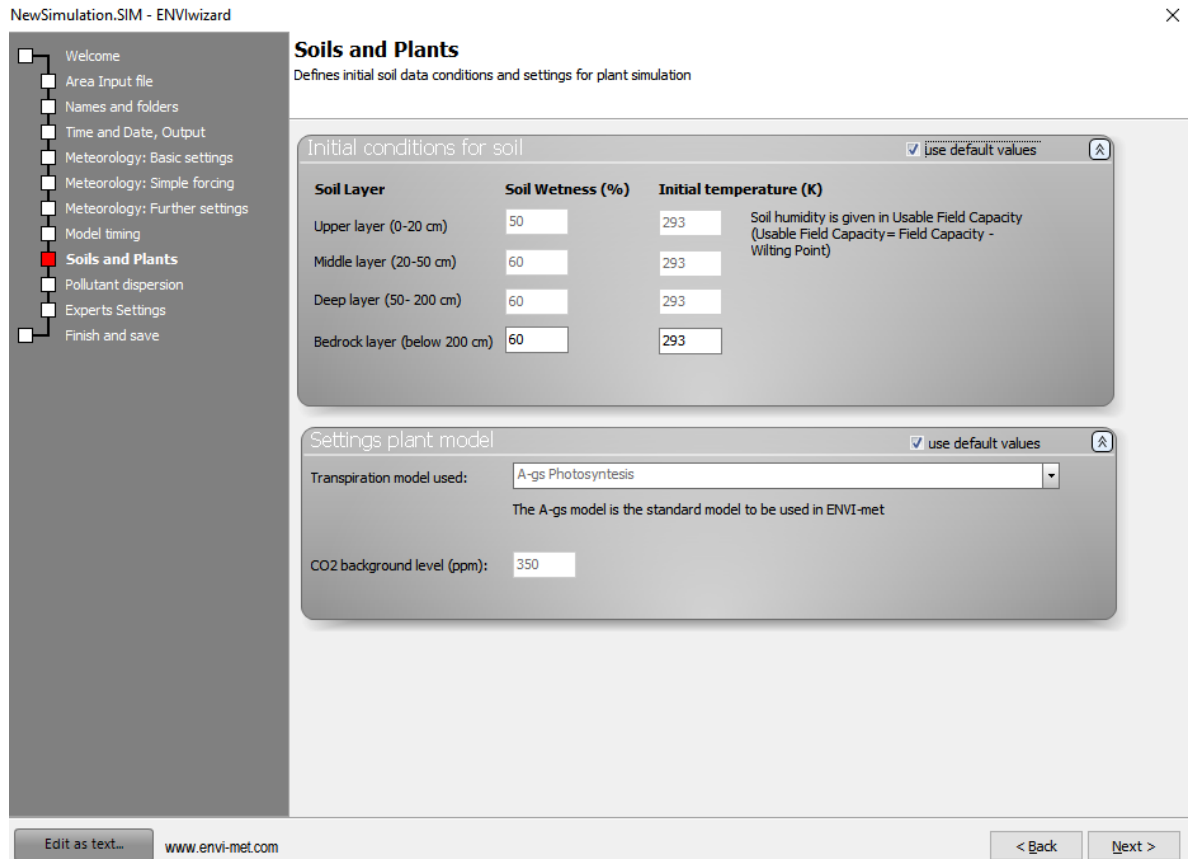


4.5. SUELOS Y PLANTAS

En la ventana mostrada en la figura 18, el software permite cambiar la temperatura inicial para cuatro tipos de capa de suelo, por defecto esta se encuentra a 20°C cada una, en vista de que este valor es adecuado no se realizan modificaciones en esta sección.

En los ajustes para las plantas se encuentra un único modelo de transpiración denominado “modelo A-gs”, basado en las teorías de Jacobs (1994)¹⁵, que calcula el estado de los estomas¹⁶ a partir del proceso de fotosíntesis y de la concentración de CO₂.

Figura 18. Ajustes de suelos y plantas.



¹⁵ ENVI-met. ENVI-met Model Architecture: Vegetation Model. [en línea]. <<http://www.envi-met.com/documents/onlinehelpv3/helpindex.htm> [citado 19 de agosto de 2016]

¹⁶ Estomas: Los estomas son grupos de dos o más células epidérmicas especializadas cuya función es regular el intercambio gaseoso y la transpiración

4.6. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES Y SIMULACIÓN.

Envi-met permite la modificación de unas propiedades generales para los contaminantes, entre las cuales está la opción de elegir si se quiere la dispersión de uno o varios contaminantes en el entorno, así como también, seleccionar el despliegue de fórmulas químicas para hacer un enlace entre ellos. En este caso se seleccionó la opción de contaminantes individuales

El nombre dado a este arreglo de contaminantes en este caso de estudio fue “My pollutant” y se seleccionó el CO₂ como el contaminante a simular, tal como se puede ver en la figura 19.

Figura 19. Ajustes para la dispersión de contaminante.

The screenshot displays the 'Pollutant dispersion' configuration window. On the left, a navigation tree lists various setup steps, with 'Pollutant dispersion' highlighted in red. The main area is divided into two sections: 'General settings' and 'User-defined pollutant'. In the 'General settings' section, the 'Operation mode' is set to 'Single pollutant', and 'NO-O3-NO2 chemistry' is set to 'No chemistry'. The 'Update interval for emission rates (s)' is set to 600.0. The 'User-defined pollutant' section shows the name 'MyPollutant' and the chemical species 'CO2 (Carbon dioxide)' selected from a dropdown menu. At the bottom, there are buttons for '< Back', 'Next >', and 'Cancel'.

Finalmente, para poder realizar la simulación se seleccionó la opción “versión 250X250X30” del módulo Envi-met, allí se cargó el archivo creado en el proceso de configuración, posteriormente se realizó una verificación del modelo y su configuración mediante el botón “Check simulation”, se comprobó que no arrojara errores de construcción y configuración mediante los avisos de alerta del software. Una vez realizado la verificación se corre la simulación que tarda aproximadamente 3 semanas para completar 48 horas de estudio.

5. RESULTADOS

Como resultado de la simulación Envi-met permite conocer en cada uno de los volúmenes de estudio una variedad de datos mediante tablas de datos y mapas térmicos en 2 o 3 dimensiones y con el fin de mostrar de manera cualitativa y cuantitativa los efectos del estudio.

Los resultados que se analizan en este proyecto son: Temperatura del aire, velocidad del viento, CO₂, índice de voto estimado medio (PMV) y porcentaje de personas insatisfechas (PPD) para diferentes volúmenes del entorno.

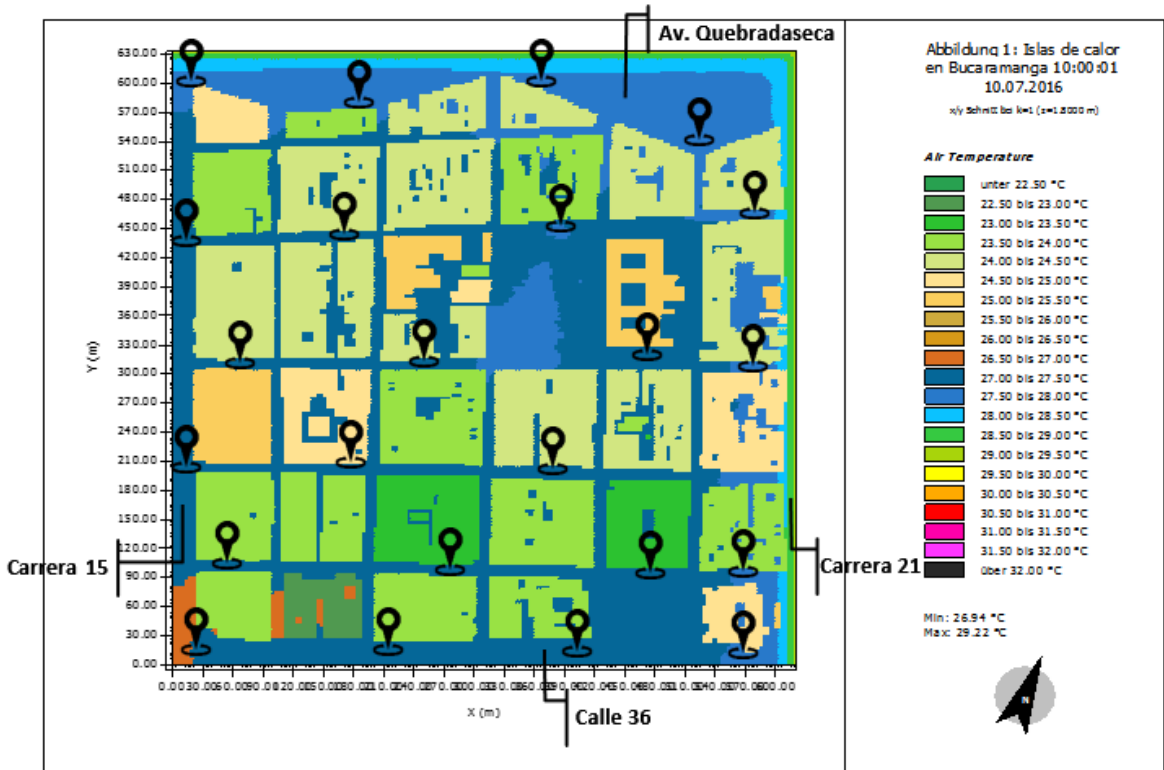
5.1. TEMPERATURA DEL AIRE

Para encontrar islas de calor en el centro de la ciudad de Bucaramanga se realiza un análisis del comportamiento variacional de la temperatura en diferentes aspectos del entorno como: A lo largo de las calles, A lo largo de las carreras, en patios y parques, todos ellos a 1 metro de altura de la superficie en vista de que esta es una ubicación perceptible para los ciudadanos.

5.1.1. Análisis de la temperatura del aire a lo largo de las calles.

El centro de la ciudad se comprende desde la calle 36 hasta la Avenida Quebrada Seca y desde la carrera 15 hasta la 21, esto hace referencia a 43667 volúmenes en el modelo virtual. Por esto, para el estudio del comportamiento de la temperatura entre dichas calles se tomaron varios volúmenes aleatorios y estratégicos a lo largo de estas, como se puede ver en la figura 20.

Figura 20. Mapa térmico del centro de Bucaramanga a las 10:00 am, el día 10 de Julio de 2016, con señalización en puntos de estudio a lo largo de las calles.



Gracias al fichero de tablas que permite exportar Envi-met se realizaron figuras de temperatura versus hora del día, para cada uno de los puntos de las calles con el fin de determinar su comportamiento.

Figura 21. Temperatura del aire hora a hora a lo largo de la calle 36, desde la carrera 15 hasta la carrera 21, los días 9 y 10 de Julio de 2016.

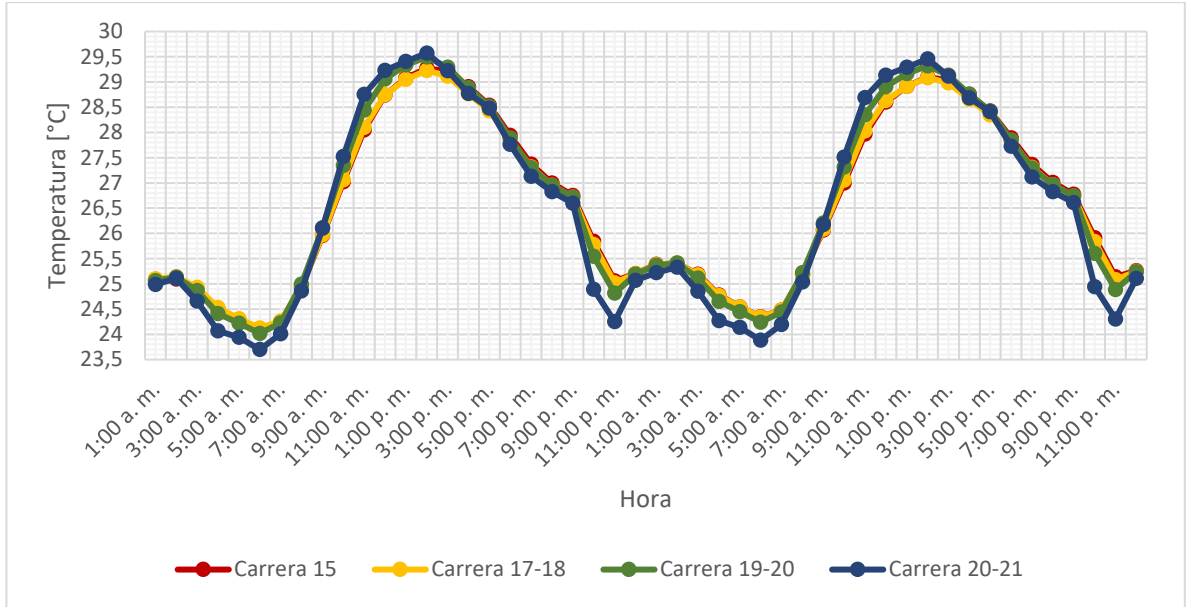


Figura 22. Temperatura del aire hora a hora a lo largo de la calle 35, desde la carrera 15 hasta la carrera 21, los días 9 y 10 de Julio de 2016.

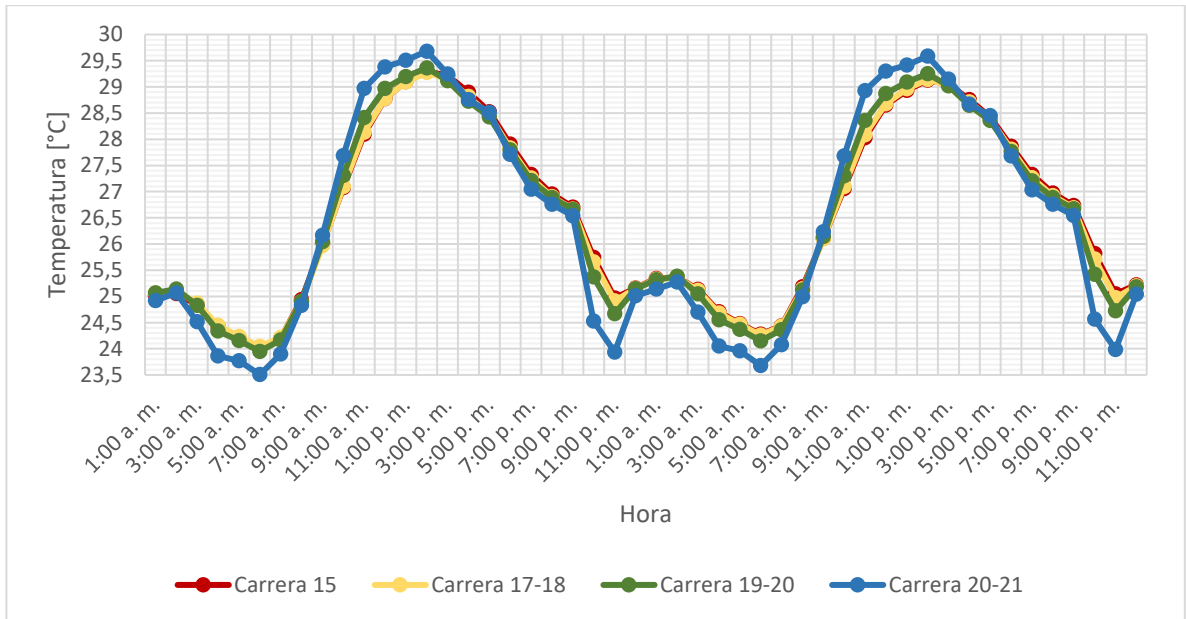


Figura 25. Temperatura del aire hora a hora a lo largo de la calle 32, desde la carrera 15 hasta la carrera 21, los días 9 y 10 de Julio de 2016.

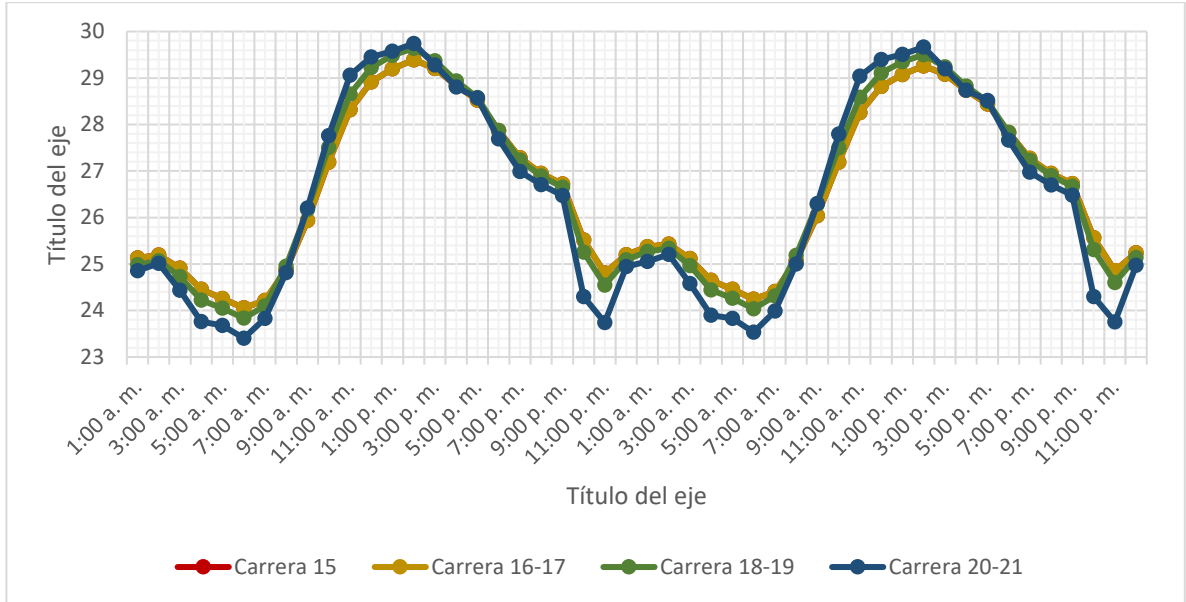
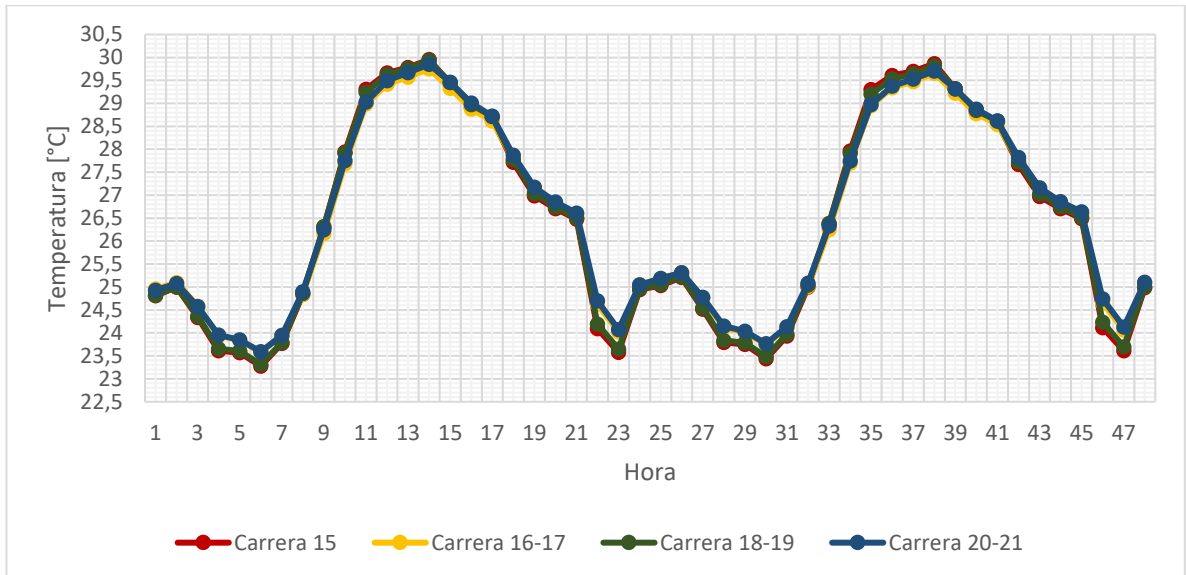


Figura 26. Temperatura del aire hora a hora a lo largo de la Avenida Quebrada Seca, desde la carrera 15 hasta la carrera 21, los días 9 y 10 de Julio de 2016.



Las figuras 21, 22, 23, 24, 25 y 26 mostradas anteriormente corresponden a 6 de las 7 calles que hay en el centro de la ciudad; en cada una de ellas se puede observar una misma tendencia en el comportamiento de la temperatura, en el cual se presentan valores picos tanto en horas de la mañana como en horas de la noche. Para las horas de la mañana la mayor temperatura se presenta hacia la carrera 21 y va disminuyendo hacia la carrera 15, mientras que en horas de la noche el comportamiento es totalmente contrario, presentando una mayor temperatura en la carrera 15 y la menor en la carrera 21.

La tabla 5 es un resumen de los valores de temperatura y su variación en los puntos de mayor impacto en cada una de las calles.

Tabla 5. Valores de la temperatura en los puntos de mayor impacto y su variación .

CALLE	Hora	TEMPERATURA		
		Carrera 15	Carrera21	Deltha
36	4:00 a. m.	24,78	24,272	0,508
	6:00 a. m.	24,349	23,885	0,464
	10:00 p. m.	26,997	27,51	-0,513
	11:00 a. m.	27,968	28,687	-0,719
	2:00 p. m.	29,097	29,458	-0,361
	10:00 p. m.	25,913	24,94	0,973
	11:00 p. m.	25,14	24,302	0,838
35	4:00 a. m.	24,707	24,053	0,654
	6:00 a. m.	24,278	23,681	0,597
	10:00 p. m.	27,06	27,679	-0,619
	11:00 a. m.	28,026	28,924	-0,898
	2:00 p. m.	29,127	29,585	-0,458
	10:00 p. m.	25,815	24,565	1,25
	11:00 p. m.	25,048	23,984	1,064
34	4:00 a. m.	24,718	24,163	0,555
	6:00 a. m.	24,293	23,782	0,511
	10:00 p. m.	27,065	27,587	-0,522
	11:00 a. m.	28,05	28,779	-0,729

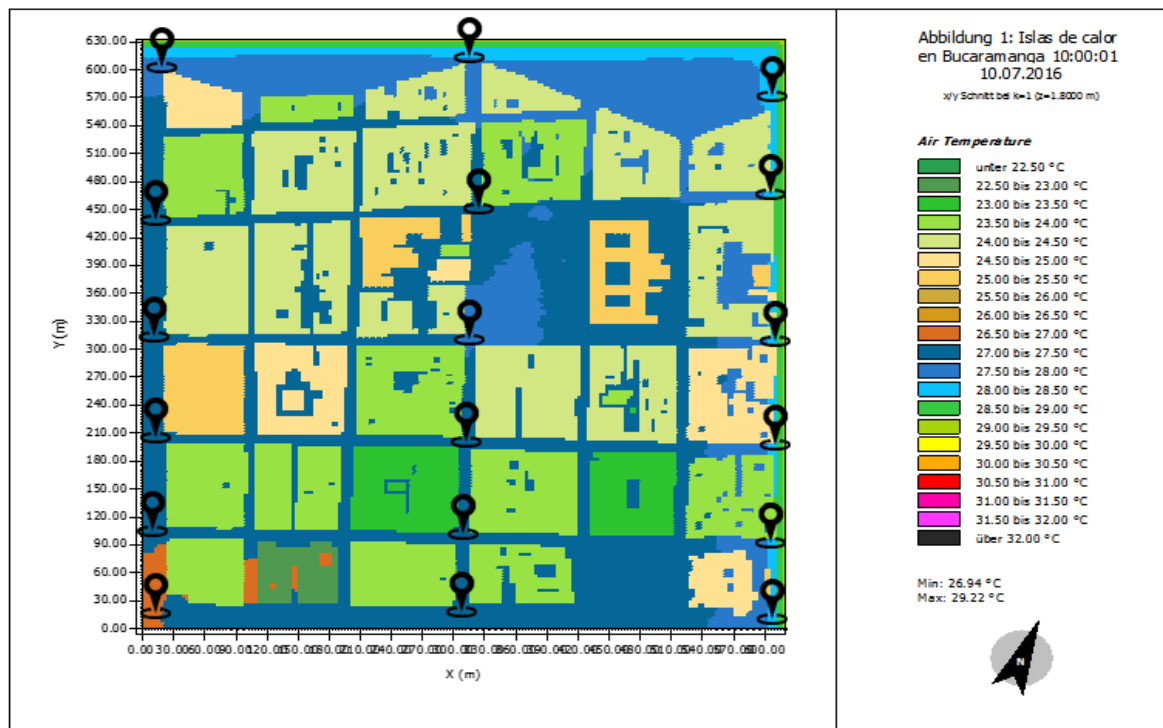
	2:00 p. m.	29,168	29,53	-0,362
	10:00 p. m.	25,779	24,76	1,019
	11:00 p. m.	25,022	24,147	0,875
33	4:00 a. m.	24,657	24,033	0,624
	6:00 a. m.	24,238	23,662	0,576
	10:00 p. m.	27,167	27,686	-0,519
	11:00 a. m.	28,179	28,931	-0,752
	2:00 p. m.	29,223	29,593	-0,37
	10:00 p. m.	25,661	24,523	1,138
	11:00 p. m.	24,926	23,95	0,976
32	4:00 a. m.	24,652	23,898	0,754
	6:00 a. m.	24,242	23,534	0,708
	10:00 p. m.	27,187	27,795	-0,608
	11:00 a. m.	28,256	29,041	-0,785
	2:00 p. m.	29,26	29,666	-0,406
	10:00 p. m.	25,562	24,298	1,264
	11:00 p. m.	24,854	23,756	1,098
Av Quebrada Seca	4:00 a. m.	23,791	24,146	-0,355
	6:00 a. m.	23,436	23,764	-0,328
	10:00 p. m.	27,965	27,746	0,219
	11:00 a. m.	29,297	28,973	0,324
	2:00 p. m.	29,863	29,707	0,156
	10:00 p. m.	24,117	24,743	-0,626
	11:00 p. m.	23,61	24,131	-0,521

La tabla 5 muestra las horas para los valores picos de temperatura durante el segundo día de la simulación, en ella se ve también la diferencia de temperatura entre la carrera 15 y la 21. Para la calle 36 hasta la calle 32 se presentan variaciones considerablemente altas, llegando incluso a más de 1,25 °C de diferencia en horas de la noche (bajas temperaturas) y a 0.9 °C en horas de la mañana (altas temperaturas); mientras que para la avenida Quebrada Seca las variaciones de temperatura son casi nulas, esto se debe a que la calle es muy amplia y en el modelo no hay edificios a lado y lado, permitiendo así una libre circulación del viento que generaliza las condiciones térmicas de la calle durante todo el día.

5.1.2. Análisis de la temperatura del aire a lo largo de las carreras.

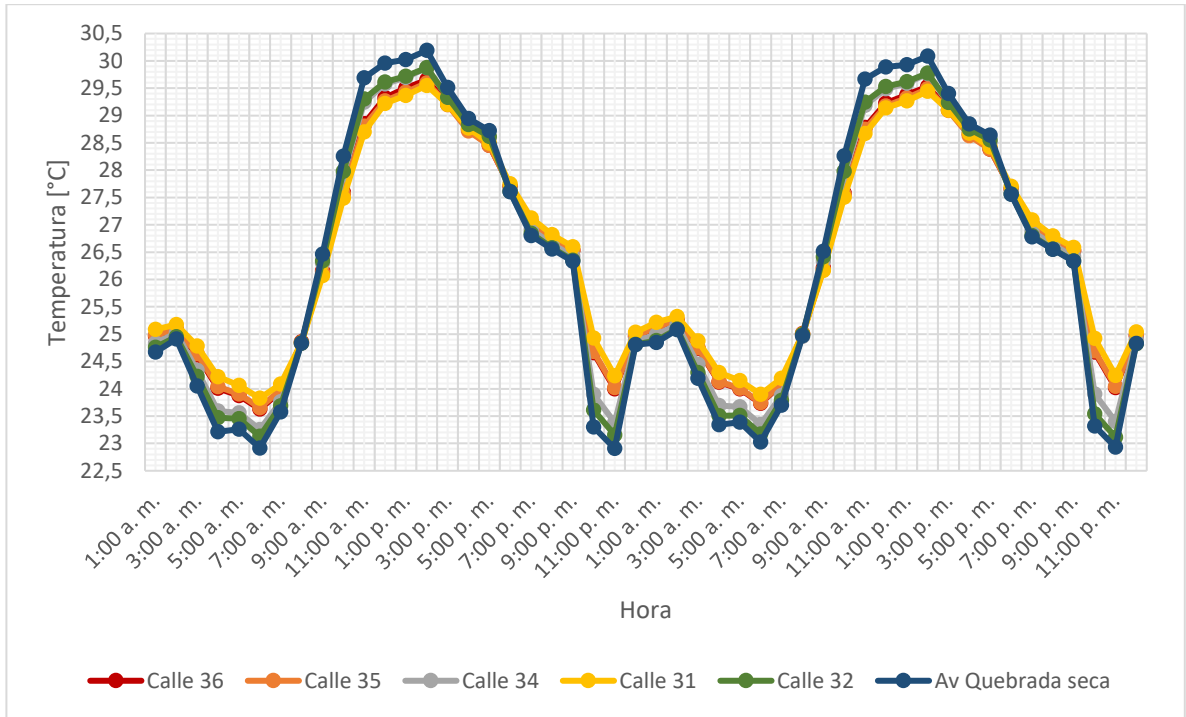
Con el fin de establecer de manera concreta las zonas de mayor variación de temperatura y así encontrar las islas de calor urbano, se analizará también la carrera 15, 18 y 21, a través de las distintas calles del sector de la manera que se muestra en la figura 27.

Figura 27. Mapa térmico del centro de Bucaramanga a las 10:00 am, el día 10 de Julio de 2016, con señalización en puntos de estudio a lo largo de las carreras.



A continuación, se presenta una serie de figuras de temperatura del aire versus hora para cada uno de los puntos del mapa anterior, agrupados en las carreras mencionadas anteriormente.

Figura 30. Temperatura del aire hora a hora a lo largo de la carrera 21, desde la calle 36 hasta la Avenida Quebrada Seca, los días 9 y 10 de Julio de 2016.



Se puede evidenciar mediante las figuras 28, 29, 30, que a medida que se realiza un desplazamiento por cada una de las carreras estudiadas, la temperatura aumenta desde la calle 36 hasta la Avenida Quebrada Seca en horas de la mañana y en horas de la noche el comportamiento es totalmente contrario, presentando así un comportamiento similar al resultado del análisis anterior.

La tabla 6 es un resumen con las horas, valores y variaciones de la temperatura en los puntos de mayor impacto a lo largo de las carreras.

Tabla 6. Valores de la temperatura en los puntos de mayor impacto y su variación a lo largo de las carreras.

CARRERA	Hora	TEMPERATURA		
		Calle 36	Av. Quebrada Seca	Variación
15	4:00 a. m.	24,78	23,791	0,989
	6:00 a. m.	24,349	23,436	0,913
	10:00 p. m.	26,997	27,965	-0,968
	11:00 a. m.	27,968	29,297	-1,329
	2:00 p. m.	29,097	29,863	-0,766
	10:00 p. m.	25,913	24,117	1,796
	11:00 p. m.	25,14	23,61	1,53
18	4:00 a. m.	24,729	23,669	1,06
	6:00 a. m.	24,31	23,323	0,987
	10:00 p. m.	27,164	28,045	-0,881
	11:00 a. m.	28,166	29,391	-1,225
	2:00 p. m.	29,184	29,932	-0,748
	10:00 p. m.	25,747	23,926	1,821
	11:00 p. m.	25,011	23,449	1,562
21	4:00 a. m.	24,118	23,344	0,774
	6:00 a. m.	23,733	23,026	0,707
	10:00 p. m.	27,581	28,262	-0,681
	11:00 a. m.	28,779	29,666	-0,887
	2:00 p. m.	29,531	30,089	-0,558
	10:00 p. m.	24,673	23,319	1,354
	11:00 p. m.	24,022	22,934	1,088

Para este caso se obtuvo un resultado similar al análisis realizado a lo largo de las calles, encontrando variaciones de casi 1.9 °C en horas de la noche y hasta 1.3 °C en las horas de la mañana.

En vista, de que tanto en el análisis a lo largo de las calles y carreras se encontraron las mayores variaciones de temperatura significativas, desde las 6:00 pm hasta las 7:00 am, como se puede ver en la figura 31.

Figura 31. Comparativo de la temperatura entre la carrera 15 con calle 36 y la Avenida Quebrada Seca con carrera 21.

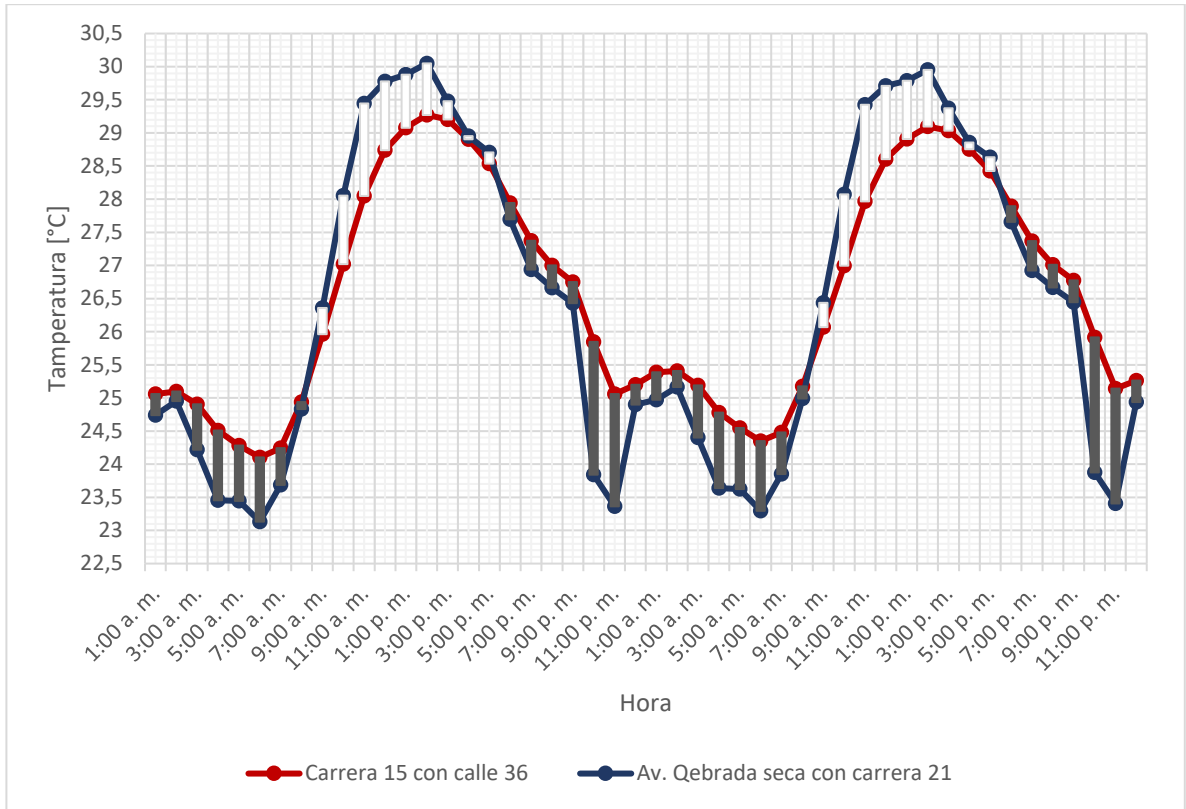
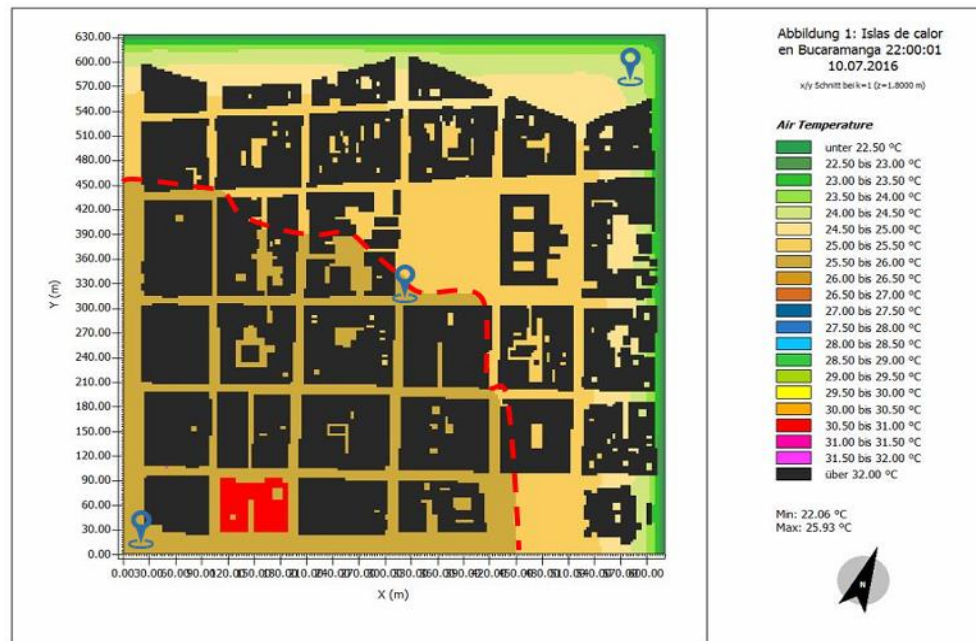


Tabla 7. Valores de la temperatura en 2 puntos críticos y su variación.

Hora	TEMPERATURA		
	Carrera 15 con calle 36	Av. Quebrada Seca con carrera 21	Variación
4:00 a. m.	24,78	23,638	1,14
6:00 a. m.	24,349	23,294	1,05
10:00 p. m.	26,997	28,073	-1,08
11:00 a. m.	27,968	29,424	-1,46
2:00 p. m.	29,097	29,952	-0,85
10:00 p. m.	25,913	23,874	2,04
11:00 p. m.	25,14	23,405	1,73

Se establece finalmente que la isla de calor urbano se encuentra en la franja horaria mencionada anteriormente. Para conocer la zona física del sector donde se presenta la isla de calor, se genera la figura 32 con el mapa térmico del sector a las 10:00 pm el día 10 de julio, ya que es en esta hora donde se presentan las mayores variaciones de temperatura tal como se puede ver en la tabla 7. Se sabe con seguridad que la isla de calor estará en la zona de intersección de la calle 36 con carrera 15 ya que es allí donde se presentan las temperaturas mal altas en las horas mencionadas anteriormente y por tanto se toma la zona con una temperatura igual o similar a esta como el sector de la isla de calor.

Figura 32. Mapa térmico del centro de Bucaramanga a las 10:00 pm, el día 10 de Julio de 2016, con señalización del área que comprende la isla de calor urbano.



La línea punteada roja delimita el área que comprende la ICU, siendo esta una de las zonas de mayor concentración comercial de la ciudad de Bucaramanga. Allí hay

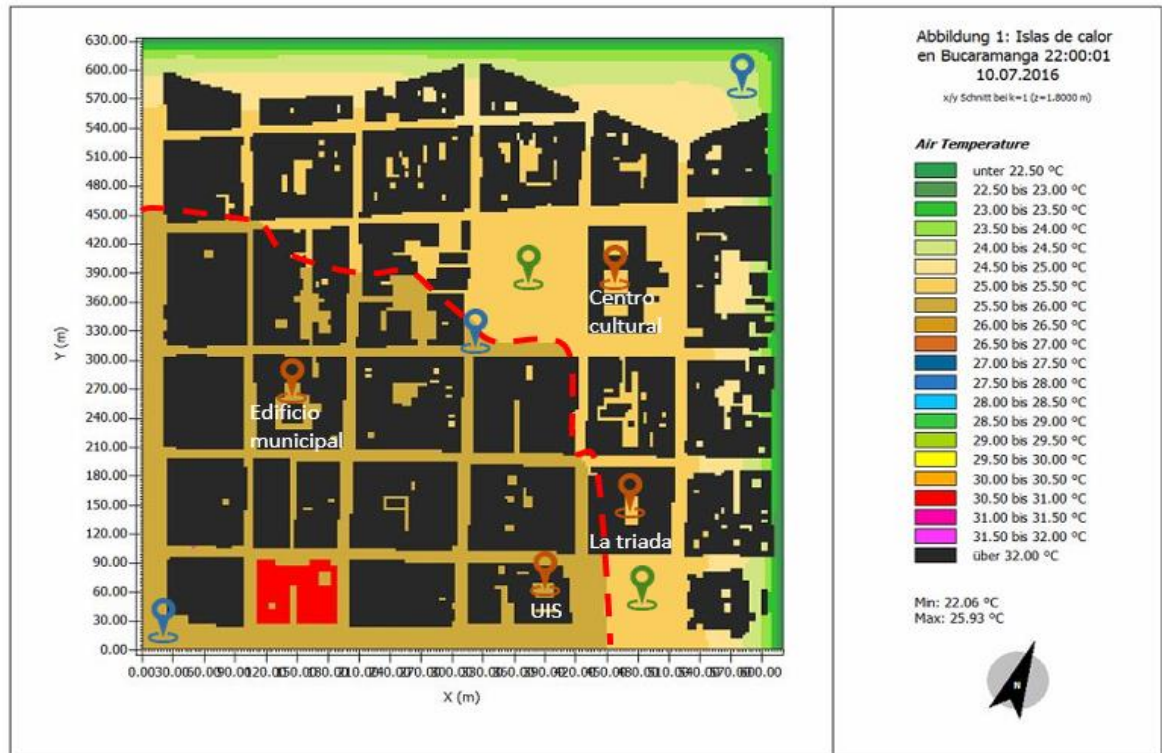
un gran número de edificaciones que alcanzan hasta los 54 metros de altura, las calles son reducidas y la vegetación es escasa, motivos más que suficientes para que sea precisamente en este lugar donde finalmente se encuentra la ICU. Una de las principales causas de este problema recae en la absorción de energía durante el día por parte de los edificios y calles, la cual se libera en la noche aumentando la temperatura del sector.

De otro lado, en la figura 32 se marcaron 3 puntos específicos, uno en la intersección de la calle 36 con carrera 15 (extremo inferior izquierdo), el siguiente en la calle 33 con carrera 18 (centro) y el último en la avenida Quebrada Seca con carrera 21 (extremo superior derecho), los cuales serán denominados puntos críticos debido a que darán una vista amplia del comportamiento del entorno en otros aspectos que se analizarán en este proyecto.

5.1.3. Análisis de la temperatura del aire en patios y parques.

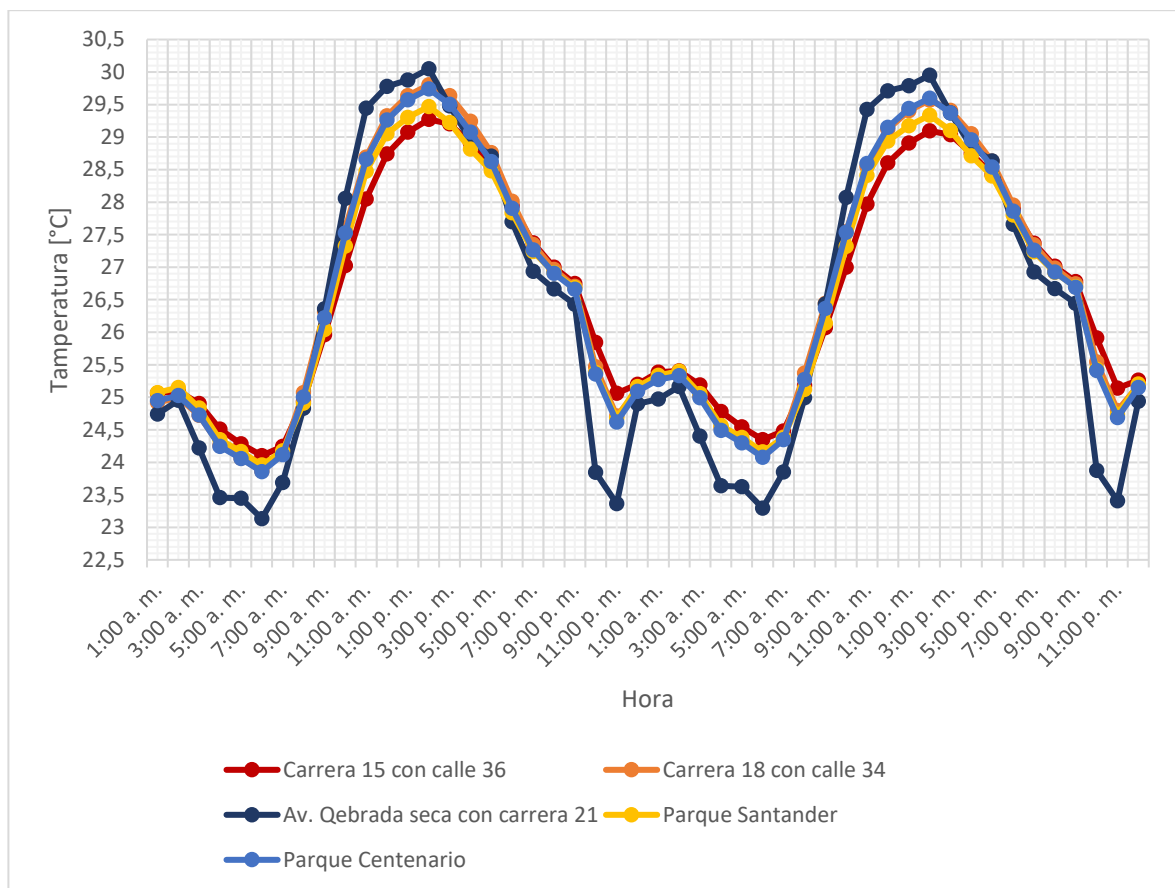
Los patios (marcadores verdes) y parques (marcadores naranjas) son lugares en los que se suele pasar parte del día, ya sea por una reunión, leyendo un libro o simplemente hablando con alguien, es por ello que se analiza de manera breve el comportamiento de la temperatura en cada uno de estos lugares con respecto a los puntos críticos (marcadores azules).

Figura 33. Mapa térmico del centro de Bucaramanga a las 10:00 pm, el día 10 de Julio de 2016, con señalización de parques, patios y puntos críticos.



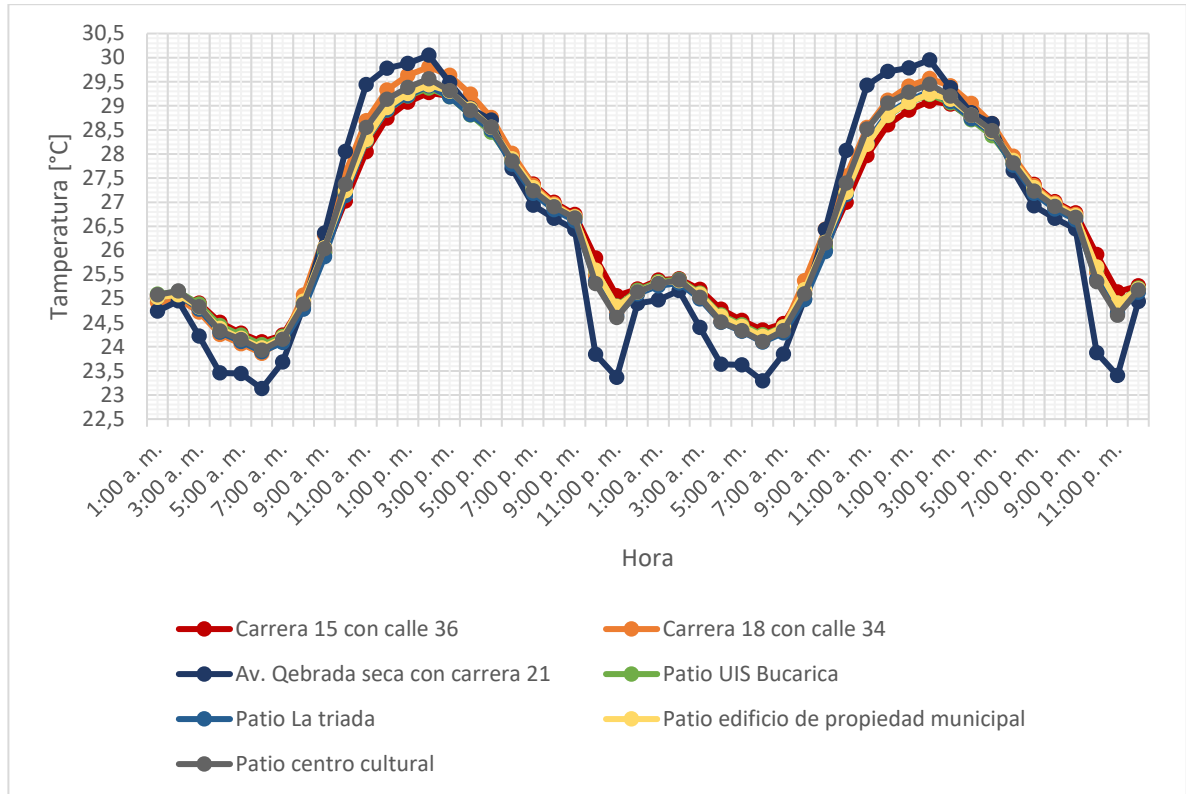
A continuación, se presentan en la figura 34 los valores de la temperatura del aire en los puntos marcados.

Figura 34. Temperatura del aire hora a hora entre parques y puntos críticos los días 9 y 10 de Julio de 2016.



Se puede observar que la temperatura de los parques Santander y Centenario presentan una tendencia similar a la del punto crítico ubicado en la carrera 18 con calle 34, de esta manera los parques que, aunque no están cerca el uno del otro, se pueden clasificar como lugares con temperaturas medias. El hecho de que no sean un referente de temperaturas inferiores en las horas de mayor temperatura, se debe a las modificaciones que han tenido a lo largo de los años, en los cuales se han incluido caminos y espacios de concreto, retirando árboles y prados que podrían haber contribuido a mejorar la temperatura del sector.

Figura 35. Temperatura del aire hora a hora entre algunos patios del sector y los puntos críticos, los días 9 y 10 de Julio de 2016.



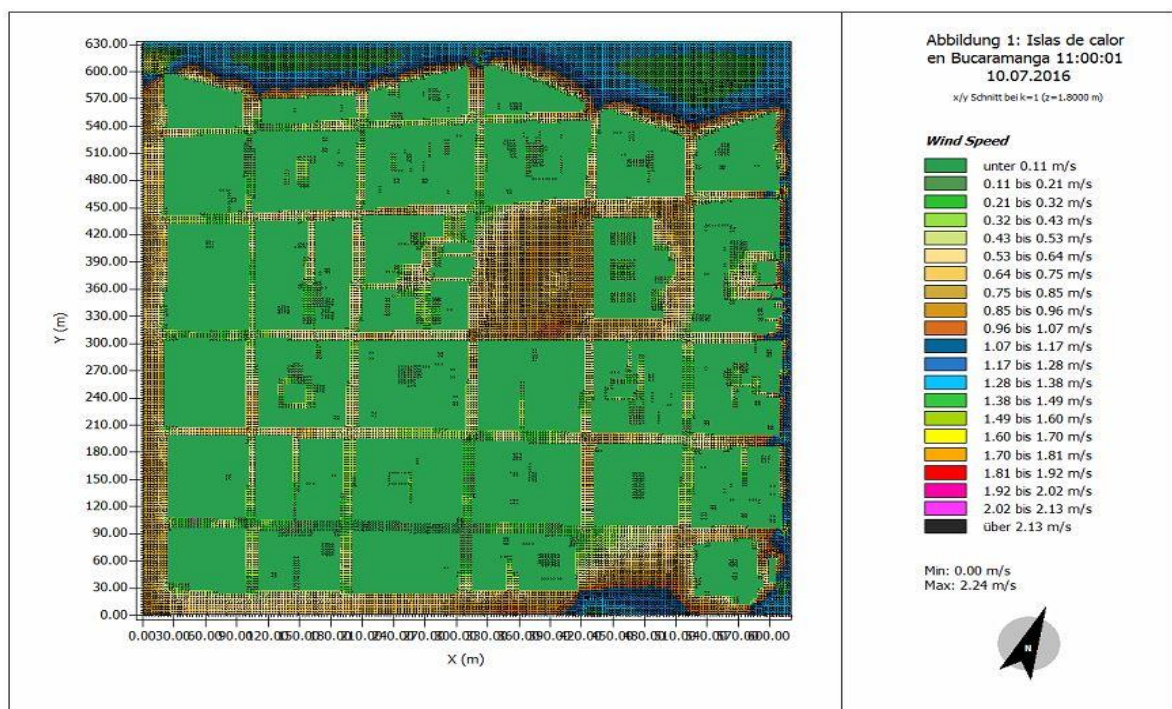
Los patios son espacios descubiertos dentro de una edificación con características climáticas propias, que en el mayor de los casos permite que las personas se sientan a gusto.

La figura 35 muestra el comportamiento de diferentes patios ubicados en el centro de la ciudad, estos lugares se comportan de igual manera que los parques, motivo por el cual también pueden ser clasificados como lugares con temperaturas medias, dichas temperaturas se dan en gran parte, a que la velocidad del viento en estos puntos disminuye drásticamente con respecto a la velocidad en el sector.

5.2. VELOCIDAD DEL VIENTO

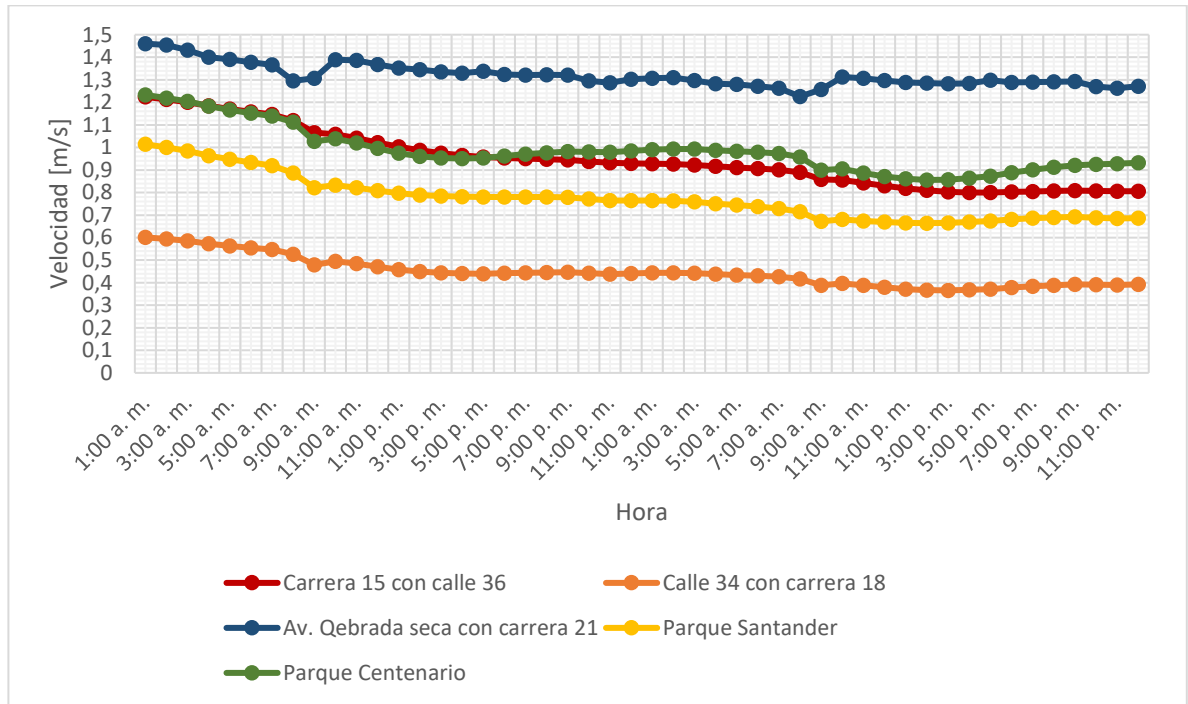
La velocidad del viento en las zonas rurales puede considerarse constante en cualquier lugar a una altura determinada, debido a la amplitud del espacio que se tiene. Por otra parte, en la zona urbana, las edificaciones, vallas publicitarias y cualquier otro tipo de obstáculo que se pueda presentar para la libre circulación del viento hace que la velocidad de este varíe.

Figura 36. Mapa con velocidades del viento y su dirección a las 12:00 horas el día 10 de julio de 2016.



A continuación, se analizará de manera gráfica la velocidad en los puntos de interés de la figura 33, teniendo en cuenta que los datos están tomados a 1 metro de altura.

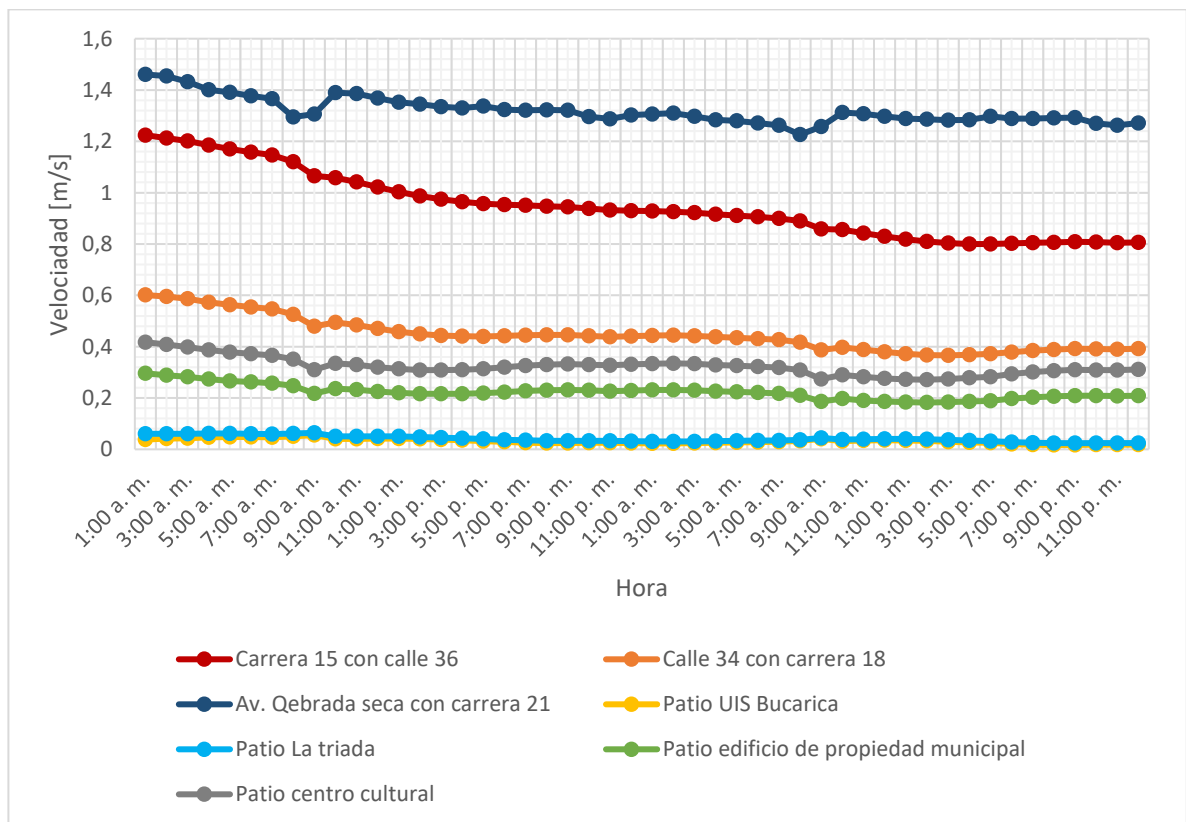
Figura 37. Velocidad del viento, hora a hora entre los parques Santander y Centenario con respecto a los puntos críticos.



Al comparar, es claro que el punto ubicado en la calle 34 con carrera 18 es el que presenta menores valores de velocidad del viento con respecto los otros puntos. Esto se debe a que este lugar está rodeado de edificaciones que funcionan como obstáculos, impidiendo la circulación del viento y disminuyendo drásticamente la velocidad del mismo. Al analizar los otros puntos se puede ver que, aunque los parques tienen mayores velocidades con respecto al punto de la calle 34, no son los de mayor valor en este estudio, a pesar de que, aunque el espacio es amplio y hay árboles, esos sectores cuentan con edificaciones en sus alrededores que contribuyen de manera negativa en la circulación del viento.

Para este caso el punto de mayor velocidad se da en la Avenida Quebrada Seca con carrera 21, cabe resaltar que esto es con base en que dicho lugar esta al final del modelo, por lo cual no se tienen edificios a lado y lado, sin embargo, no es este el único motivo de dicho resultado, pues esta calle tiene una amplitud de casi 12 metros que dan una mayor libertad a la circulación del viento.

Figura 38. Velocidad del viento, hora a hora en patios con respecto a los puntos críticos.



La disminución clara de la velocidad del viento en los patios, se debe en parte a la configuración geométrica que estos representan en la estructura y a la velocidad con que logra llegar el viento al edificio mismo. Una muestra de esto se da en el

Centro internacional La Triada, que, aunque el espacio del patio es amplio, el edificio tiene 54 metros de altura y se encuentra rodeado de edificios considerablemente altos, motivos por los cuales este lugar tiene velocidades de viento tan bajas. Mientras que, el patio del Centro Cultural del Oriente tiene un menor espacio, este edificio es de apenas 6 metros de altura y cuenta con un amplio espacio alrededor, haciendo que sea más fácil el ingreso de viento a la estructura.

5.3. CONTAMINACIÓN POR DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

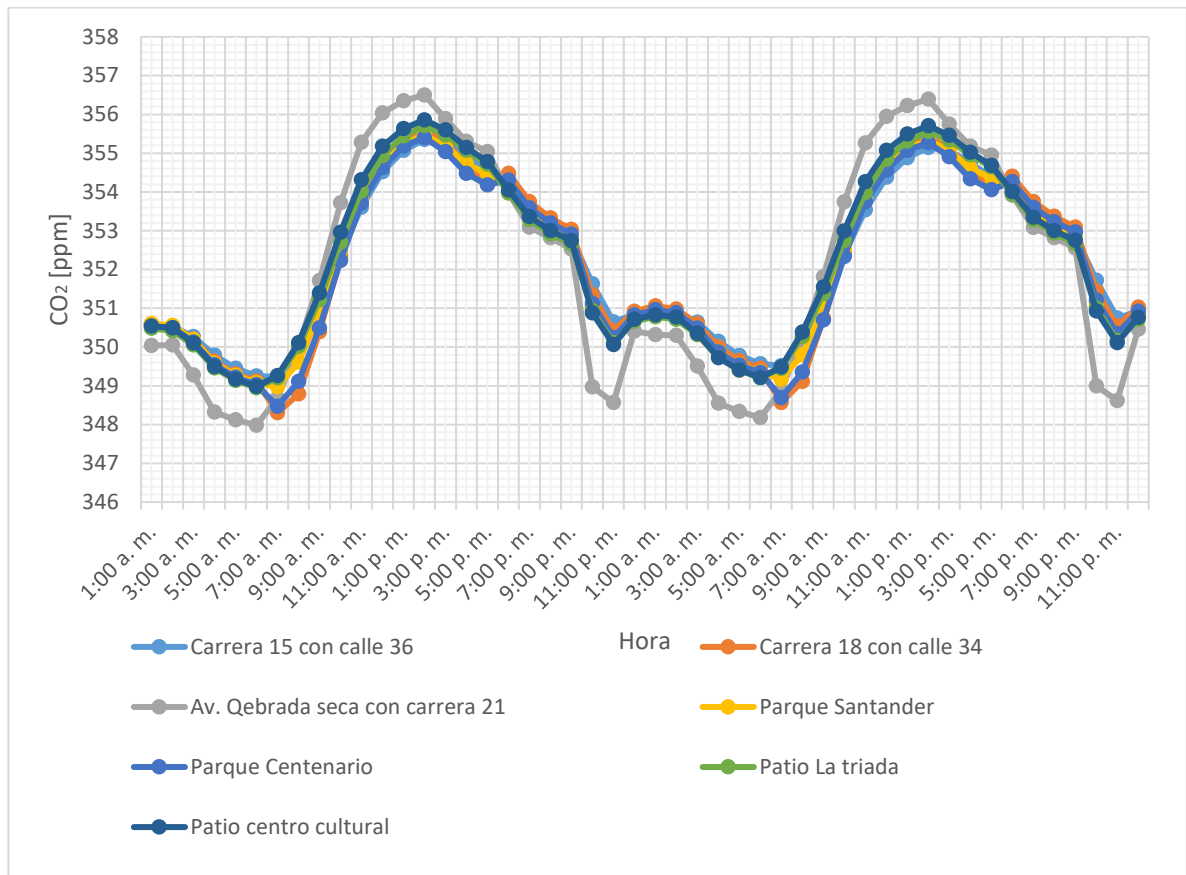
El dióxido de carbono es un agente contaminante asfixiante simple, que actúa por el desplazamiento del oxígeno y que a altas concentraciones (>30000 [ppm]), puede causar mareos, somnolencia, dolor de cabeza, problemas respiratorios, esto dependiendo del nivel de concentración y el tiempo de exposición.

En la figura 39 se muestran los valores para la concentración de CO₂ en varios puntos del centro de la ciudad que han sido objeto de estudio. En ella se puede ver que los niveles entre un lugar y otro a lo largo del día no presentan variaciones significativas, pudiendo considerarse casi constante debido a que las variaciones no superan las 10 [ppm].

El valor promedio para las concentraciones de dióxido de carbono en este proyecto es de 352 [ppm], valor permisible en áreas urbanas según la NTP 549¹⁷. De acuerdo con esto los habitantes o personas que concurren el centro de la ciudad, no están expuestas a niveles considerables de CO₂ que puedan llegar a afectar la salud.

¹⁷ MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES ESPAÑA. El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior. Barcelona: Centro nacional de condiciones de trabajo, 2000. 1-6 p.

Figura 39. Concentración de dióxido de carbono en el centro de la ciudad de Bucaramanga.



Las figuras 40 y 41 muestran mediante puntos de color rojo la distribución de CO₂ en el centro de la ciudad de Bucaramanga. En un análisis directamente hecho en el software se puede ver como dicho contaminante se desplaza en la misma dirección del aire, lo cual produce mayores concentraciones en calles donde este choca de manera constante y directa con edificios de gran tamaño que no permiten una adecuada circulación del viento.

Figura 40. Propagación de dióxido de carbono en el centro de la ciudad.

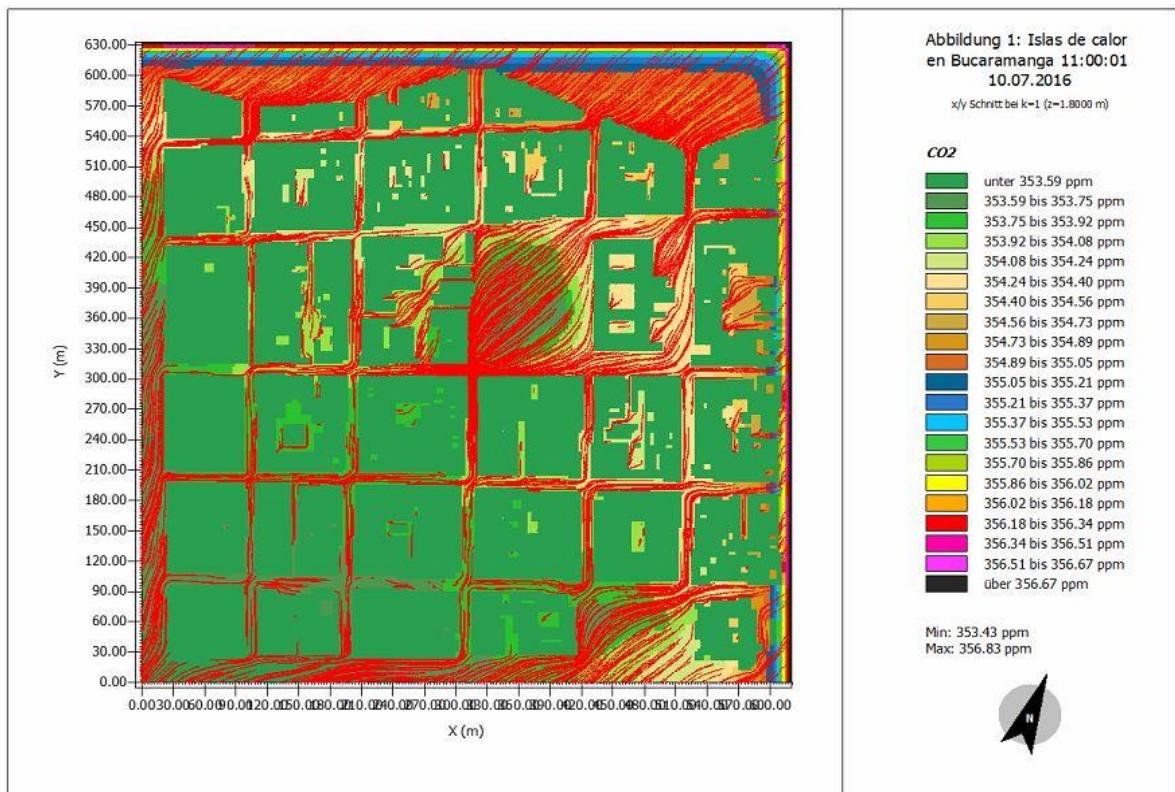
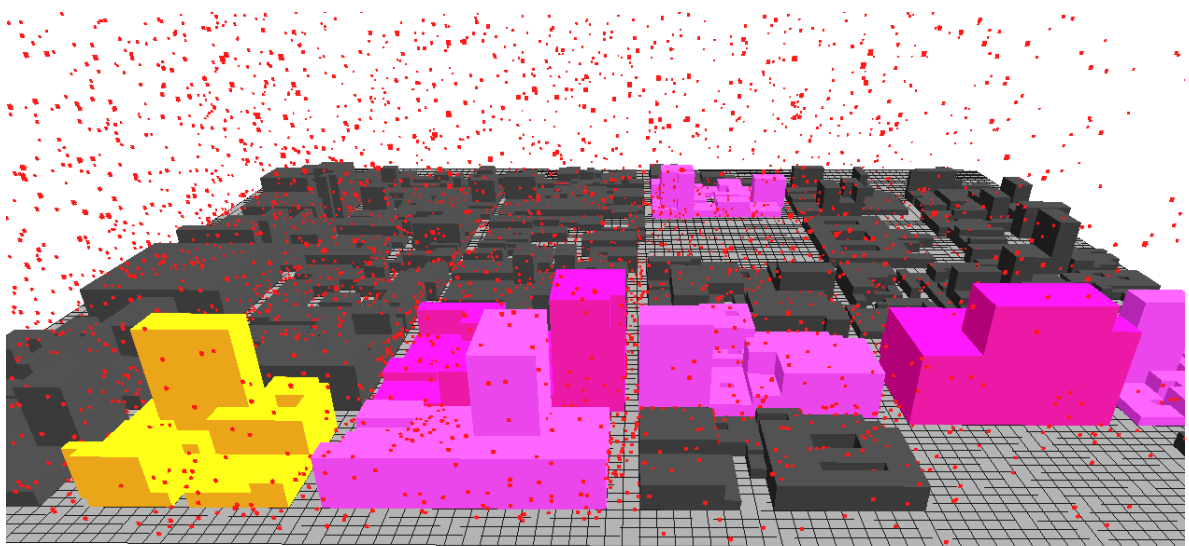


Figura 41. Propagación en 3D del dióxido de carbono en el ambiente.



5.4. ÍNDEICE DE VOTO MEDIO ESTIMADO (PMV)

El índice PMV (predicted mean vote) según la norma ISO 7730¹⁸ permite conocer la sensación térmica de un determinado grupo de personas mediante el método de Fanger, el cual establece la escala numérica de la tabla 7.

Tabla 8. Escala numérica de sensación térmica.

PUNTUACIÓN	SENSACIÓN TÉRMICA
+3	Mucho calor
+2	Bastante calor
+1	Algo de calor
0	Neutral
-1	Algo de frío
-2	Bastante frío
-3	Mucho frío

Para conocer la sensación térmica de los habitantes del centro de la ciudad de Bucaramanga se usó la aplicación “Biomet” del software Envi-met, en el cual se ensambló la carpeta resultado de la simulación y se establecieron las siguientes características metabólicas para los habitantes, teniendo en cuenta los registros del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y los parámetros establecidos en la norma ISO 7730.

¹⁸ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Ergonomics of the thermal environment: Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Switzerland: ISO, 2005. (ISO 7730).

Tabla 9. Características metabólicas para los habitantes del centro de la ciudad de Bucaramanga.

Característica	Valor	Unidad
Edad	28	Años
Estatura	1,75	m
Peso	75	Kg
Genero	Masculino	
Índice de aislamiento de vestuario	0,9	
Energía metabólica producida por el organismo	80	W
Velocidad de caminado	1,21	m/s

La edad establecida en la tabla 8 fue tomada con base en la pirámide de población total según sexo y grupos quinquenales de edad, para la ciudad de Bucaramanga¹⁹. La talla y peso se basaron en los resultados de la investigación, desarrollada por La Fundación Cardioinfantil y la Asociación Colombiana de Endocrinología Pediátrica con el apoyo del Instituto Karolinska (Suecia) y financiada por Colciencias²⁰, que buscaba obtener un diagnóstico médico más preciso sobre el crecimiento y desarrollo de los niños en el país. Mientras que los valores de los parámetros restantes son acordes con la norma ISO 7730.

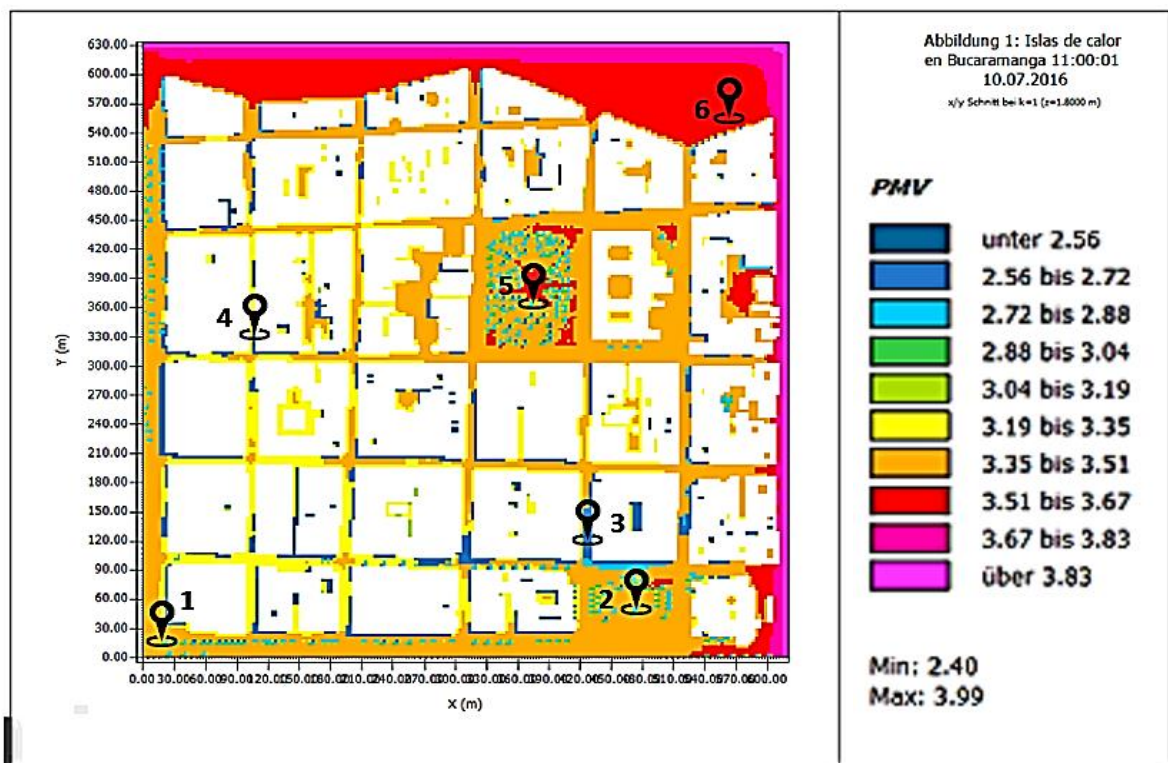
Por otra parte, el mapa térmico de la figura 42 es el resultado gráfico del cálculo del índice PMV. El mapa se generó para el día 10 de Julio de 2016 a las 11:00 am, una de las horas con mayor temperatura en el sector. En él se puede ver que, a esta hora en la mayor parte del sector la sensación térmica es de mucho calor, puesto

¹⁹ DANE. Pirámide de población total según sexo y grupos quinquenales de edad : Departamento de Santander, Municipio de Bucaramanga [en línea]. <<https://geoportal.dane.gov.co/midaneapp/pob.html>> [citado el 3 de septiembre de 2016]

²⁰ CARDIO INFANTIL. Curvas colombianas de crecimiento : ¿Cómo crecen los niños en Colombia? [en línea]. <<http://www.cardioinfantil.org/index.php/generales/item/821-estudio-curvascolombianascrecimiento>> [citado el 3 de septiembre de 2016].

que el índice PMV supera el valor de 3, llegando incluso a valores mayores a 4 en algunos sectores. Por otra parte, se ve con alivio algunos lugares con índice PMV menor a 3, lo cual refleja una sensación térmica de menos calor; dichos sectores son en su mayoría lugares en donde a esta hora hay sombra, específicamente en los parques y lugares cercanos a árboles.

Figura 42. Mapa térmico para el índice PMV a las 11:00 am del día 10 de julio de 2016



De esta manera se puede ver la importancia de los árboles en el paisaje urbano, formando parte fundamental en el confort térmico de la ciudad, además de que, purifican el aire, permiten su circulación y brindan una sensación de bienestar a los habitantes.

A continuación, se presenta de manera gráfica (figura 43 y 44) y cuantitativa (tabla 10) el índice PMV en los puntos de estudio de la Figura anterior, con el objetivo de conocer la sensación térmica de los habitantes en diferentes lugares la zona.

Tabla 10. Listado de puntos de estudio para análisis del índice de PMV

Punto	Ubicación
1	Intersección calle 36 con carrera 15
2	Parque Santander
3	Carrera 19 con calle 34 (junto al edificio La Triada)
4	Carrera 16 con calle 33
5	Carrera 15 con calle 32 (cerca de un árbol)
6	Parque Centenario
7	Parqueadero
8	Avenida Quebrada Seca con carrera 21

Figura 43. Índice PMV en diferentes calles del centro de la ciudad.

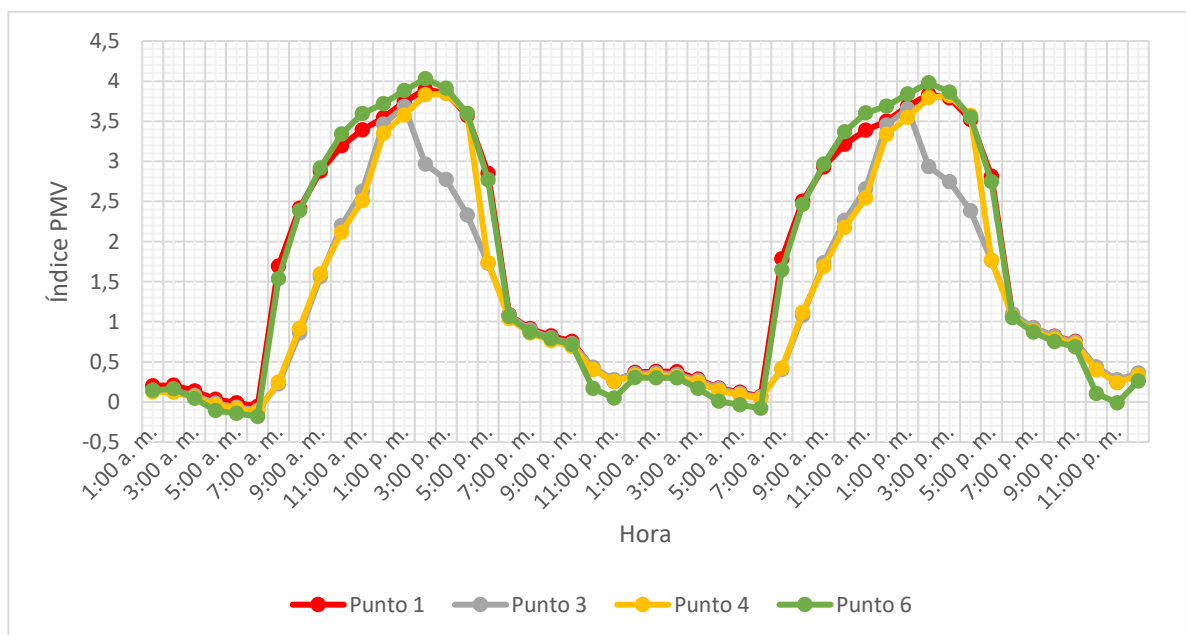


Figura 44. Índice PMV en los parques del centro de la ciudad con respecto a la Avenida Quebrada Seca.

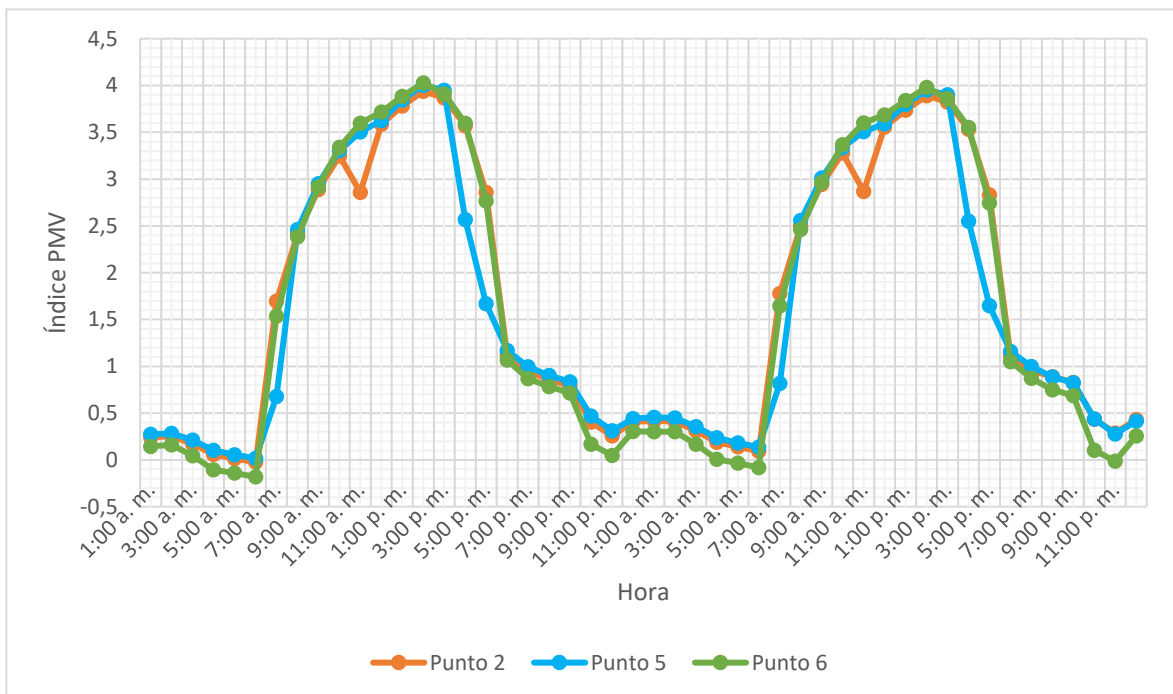


Tabla 11. Valores del índice PMV durante el día 10 de Julio de 2016

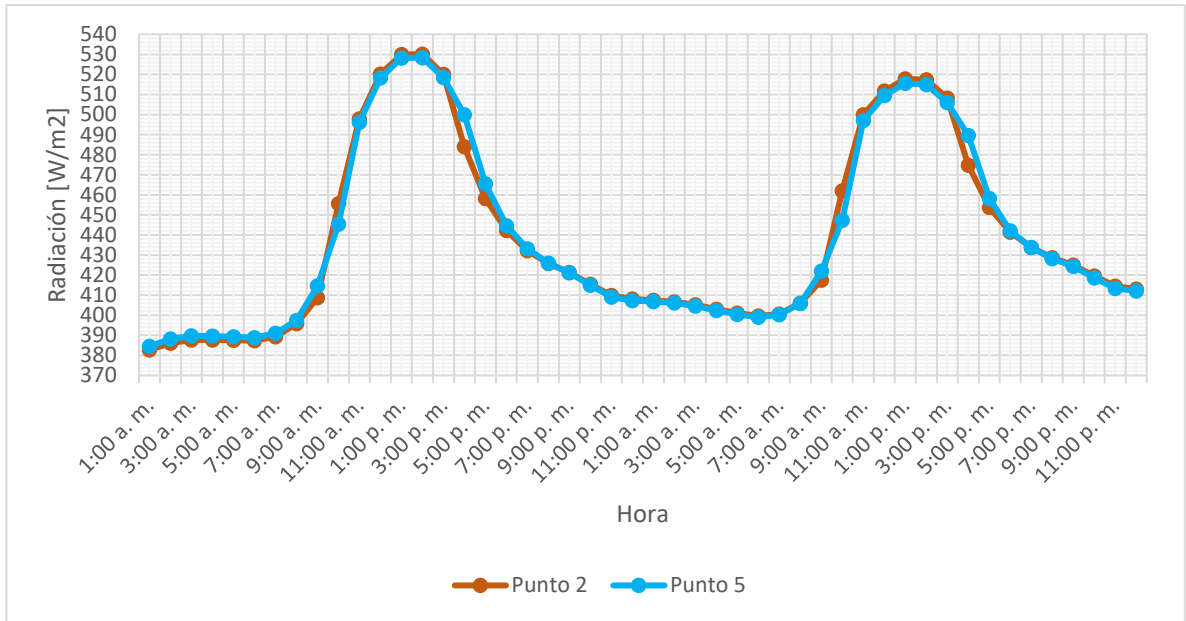
Time	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
1:00 a. m.	0,38	0,42	0,36	0,33	0,46	0,30
2:00 a. m.	0,37	0,41	0,34	0,32	0,45	0,30
3:00 a. m.	0,28	0,31	0,27	0,24	0,36	0,17
4:00 a. m.	0,17	0,19	0,16	0,14	0,24	0,01
5:00 a. m.	0,12	0,14	0,11	0,08	0,18	-0,03
6:00 a. m.	0,07	0,09	0,06	0,04	0,14	-0,08
7:00 a. m.	1,78	1,78	0,40	0,42	0,82	1,64
8:00 a. m.	2,50	2,50	1,08	1,12	2,56	2,46
9:00 a. m.	2,93	2,94	1,74	1,69	3,01	2,97
10:00 a. m.	3,21	3,28	2,26	2,17	3,34	3,37
11:00 a. m.	3,39	2,87	2,66	2,54	3,51	3,60
12:00 p. m.	3,50	3,56	3,45	3,34	3,59	3,69

1:00 p. m.	3,69	3,74	3,65	3,55	3,80	3,84
2:00 p. m.	3,83	3,89	2,93	3,80	3,95	3,98
3:00 p. m.	3,79	3,82	2,74	3,82	3,90	3,86
4:00 p. m.	3,52	3,53	2,38	3,57	2,55	3,55
5:00 p. m.	2,81	2,83	1,76	1,77	1,65	2,75
6:00 p. m.	1,07	1,11	1,10	1,06	1,16	1,05
7:00 p. m.	0,92	0,95	0,93	0,89	1,00	0,87
8:00 p. m.	0,82	0,89	0,81	0,79	0,89	0,75
9:00 p. m.	0,76	0,83	0,75	0,72	0,82	0,69
10:00 p. m.	0,41	0,44	0,44	0,40	0,44	0,10
11:00 p. m.	0,24	0,29	0,28	0,24	0,28	-0,01
11:59 p. m.	0,35	0,43	0,36	0,33	0,41	0,26

Los colores usados en la tabla 10 dan una visión general y aproximada de la sensación térmica de los habitantes del centro de la ciudad a determinada hora. Por ejemplo: se puede ver que desde las 11:00 am hasta las 4:00 pm los valores del índice de PMV son superiores a 3 en la mayoría de los puntos de estudio, motivo por el cual se puede afirmar que en dicha franja horaria la sensación térmica del centro de la ciudad es de “mucho calor”. De la misma manera desde la 1:00 am hasta las 6:00 am se obtuvieron valores muy cercanos a 0 para el índice PMV, concluyendo así que en estas horas se tiene una sensación térmica neutral.

En la figura 43 se muestra la comparación del índice PMV en los parques del sector con respecto al punto ubicado en la avenida Quebrada Seca, se puede ver que, cada uno de ellos tiene valores considerablemente menores antes y después del valor pico respectivamente, provocando mejores sensaciones térmicas en dichas horas. Esto se debe en particular a la radiación solar, ya que es esta la que calienta el aire atmosférico y aunque las variaciones son pequeñas las implicaciones en el ambiente son bastante notorias.

Figura 45. Radiación infra roja para el parque Santander y Centenario.



5.5. PORCETANJE ESTIMADO DE INSATISFECHOS (PPD)

El índice PPD permite prever de forma cuantitativa el porcentaje de personas insatisfechas con las condiciones térmicas en un determinado lugar. La insatisfacción de una persona puede ser por temperaturas muy calientes o muy frías y está ligada a las corrientes de aire, temperatura del suelo, radiación o la diferencia excesiva de temperatura entre los tobillos y la cabeza de la persona.

Envi-met calcula dicho parámetro usando las medidas establecidas en la norma ISO 7730, al igual que en el cálculo del índice de PMV.

A fin de realizar un comparativo entre los índices mencionados anteriormente, en esta sección se analizarán los mismos puntos tomados para el índice PMV (ver figura 41 y la tabla 9).

Figura 46. Índice PPD en diferentes calles del centro de la ciudad.

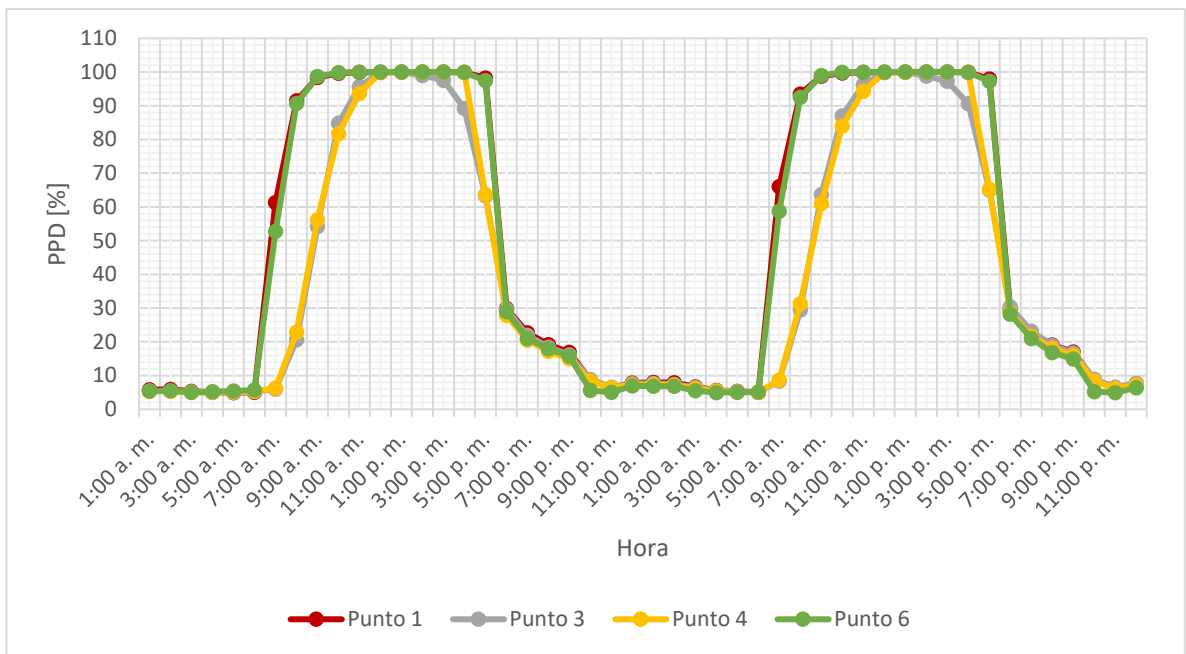
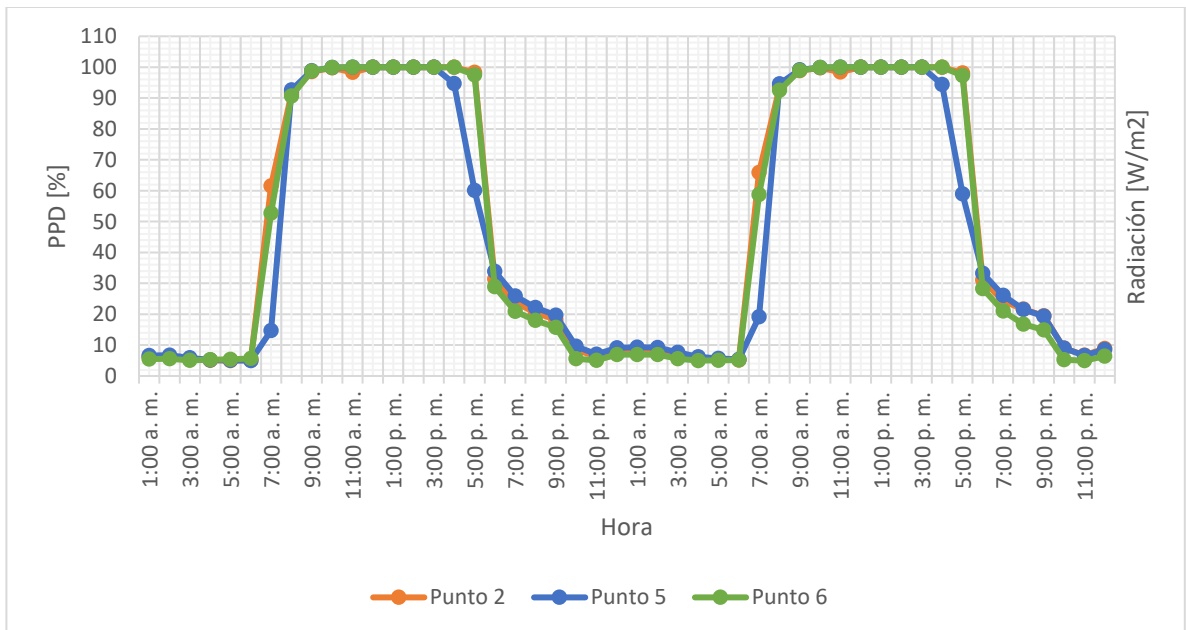


Figura 47. Índice PPD en los parques del centro de la ciudad con respecto a la avenida Quebrada Seca.



En las figuras 46 y 47 se evidencia la manera en que el porcentaje de insatisfechos está ligado a la hora del día, lo cual, a su vez tiene conexión directa con la radiación infra roja, es decir, la radiación emitida por edificios y suelos después de calentarse gracias a la radiación directa absorbida. En este estudio en particular, el 100% de las personas estará inconforme con la sensación térmica desde 9:00 am hasta las 4:00 pm en cualquier lugar del centro de la ciudad.

Las figuras 48, 49 y 50 buscan demostrar la afirmación anterior, por ello se traspone el índice PPD y la radiación infra roja en algunos de los puntos de estudio.

Figura 48. Comparativo del índice PPD y la radiación en la intersección de la calle 36 con carrera 15.

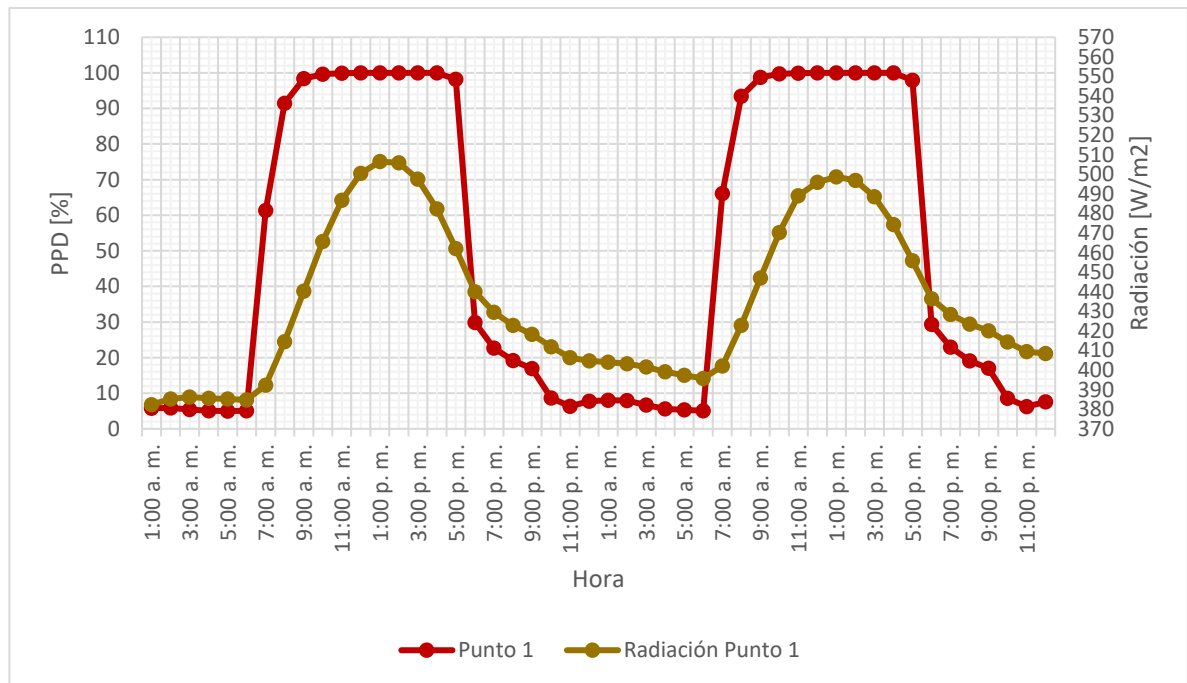


Figura 49. Comparativo del índice PPD y la radiación infra roja, en la carrera 19 entre calles 35 y 34.

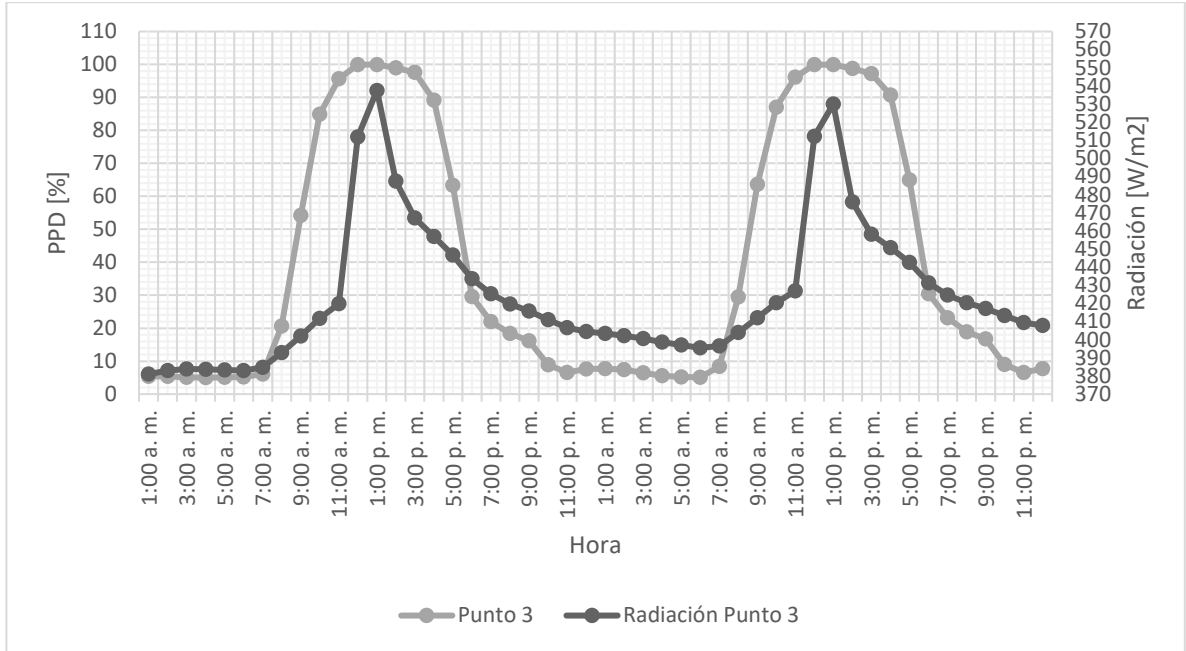
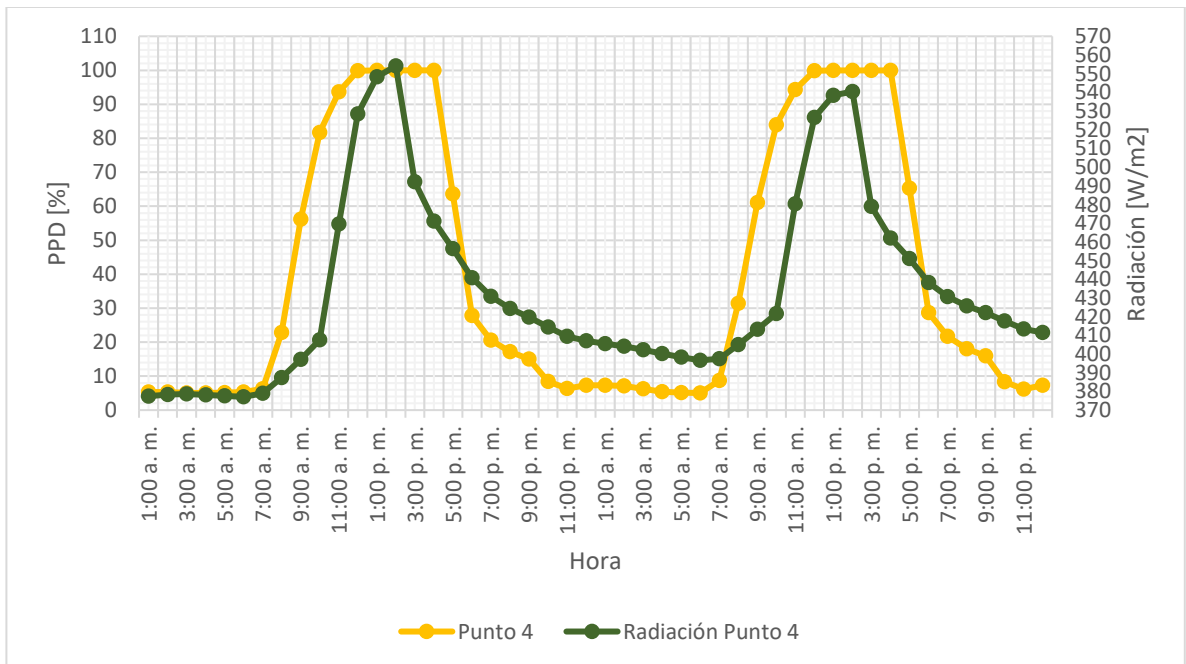
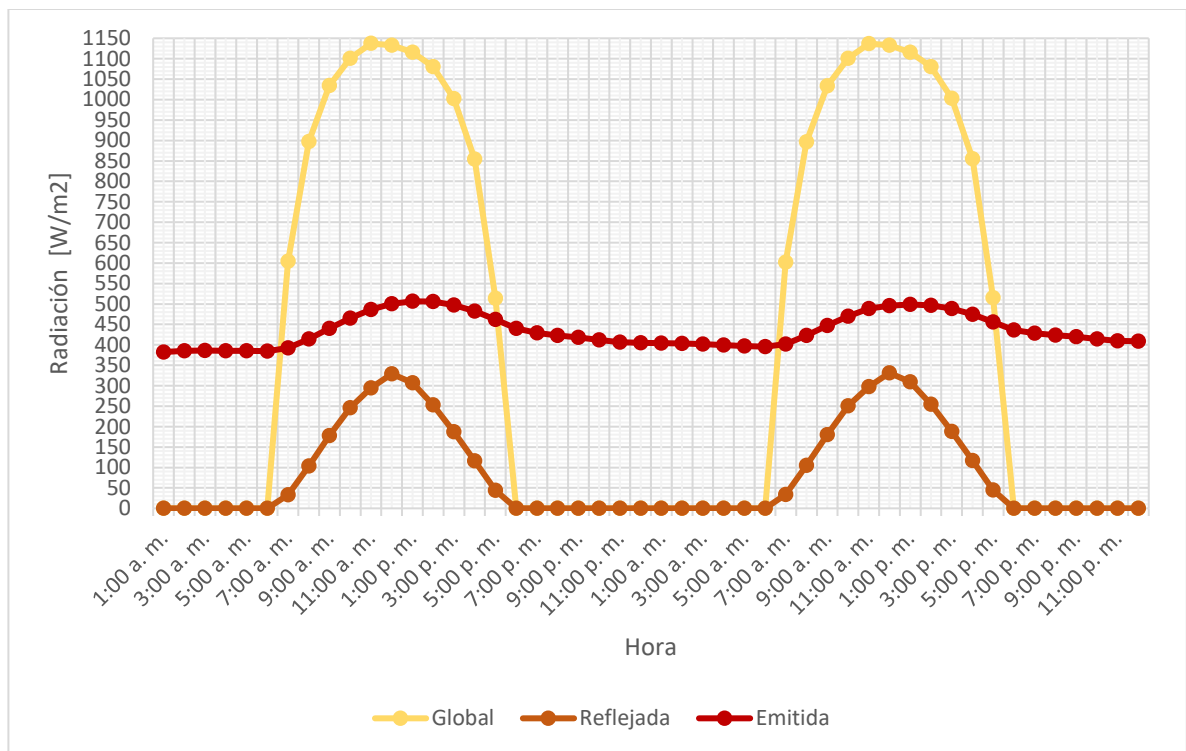


Figura 50. Comparativo del índice PPD y la radiación infra roja, en la carrera 16 entre calles 33 y 32.



Con las figuras 48, 49 y 50 se demuestra la relación que tienen los edificios, calles o cualquier otro elemento que emita radiaciones infra rojas considerables, con la insatisfacción y la sensación térmica de las personas, en varios lugares del centro de la ciudad.

Figura 51. Comparativo de la radiación en un punto de la ciudad.



De la misma manera, la figura 51 muestra 3 tipos de radiación halladas en un solo punto de la ciudad: radiación global, reflejada y emitida; este primer tipo de radiación es inevitable encontrarla en cualquier punto de la ciudad ya que está ligada a las condiciones meteorológicas de la misma; sin embargo, la radiación reflejada y la emitida son propias del sector urbano principalmente generada por calles y edificios. Es decir que al estar en un punto del centro de la ciudad una persona recibirá adicionalmente estos dos últimos tipos de radiación, en comparación con otra que este un sector rural a campo abierto.

Esto da por sentado que la disminución de zonas verdes, en un intento acelerado de dar crecimiento urbanístico a las ciudades, mediante vías de acceso, grandes edificios o cualquier masa de hormigón considerable, son factores adversos en materia de confort térmico de un lugar.

Por otro lado, los índices PMV y PPD están ligados por el método estadístico de Fanger, el cual, expuso a 1300 personas en un ambiente determinado en su escala de PMV, con el fin de conocer la insatisfacción de las mismas en dichas condiciones. A continuación, las figuras 52, 53 y 54 muestran comparaciones de los factores mencionados anteriormente.

Figura 52. PPD en función del PMV en la intersección de la calle 36 con carrera

15

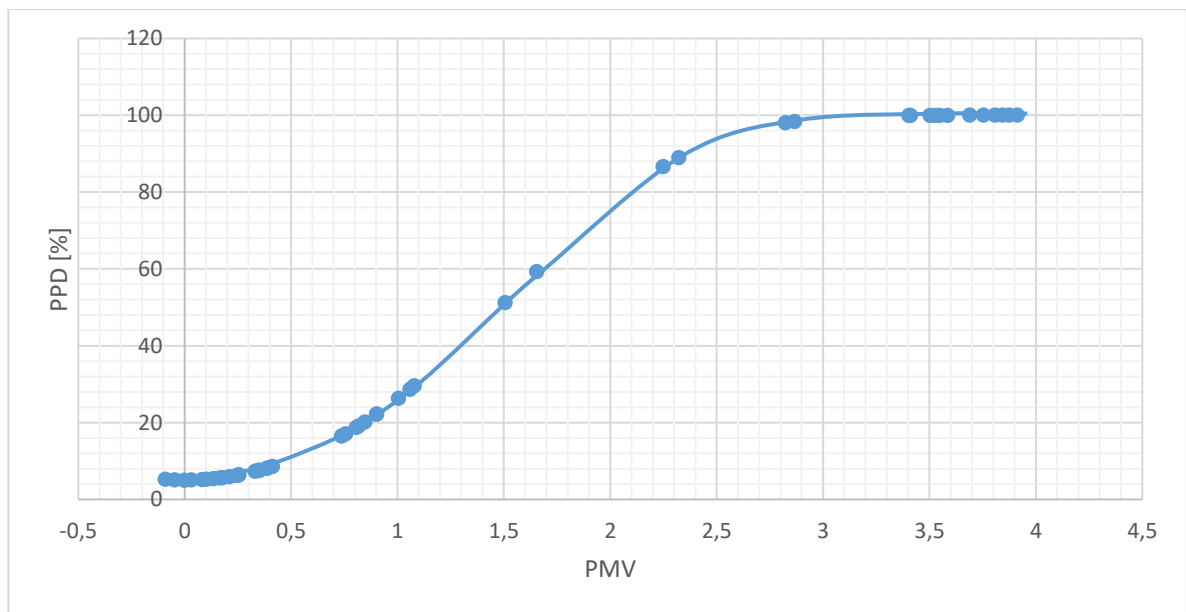


Figura 53. PPD en función del PMV en el parque Santander

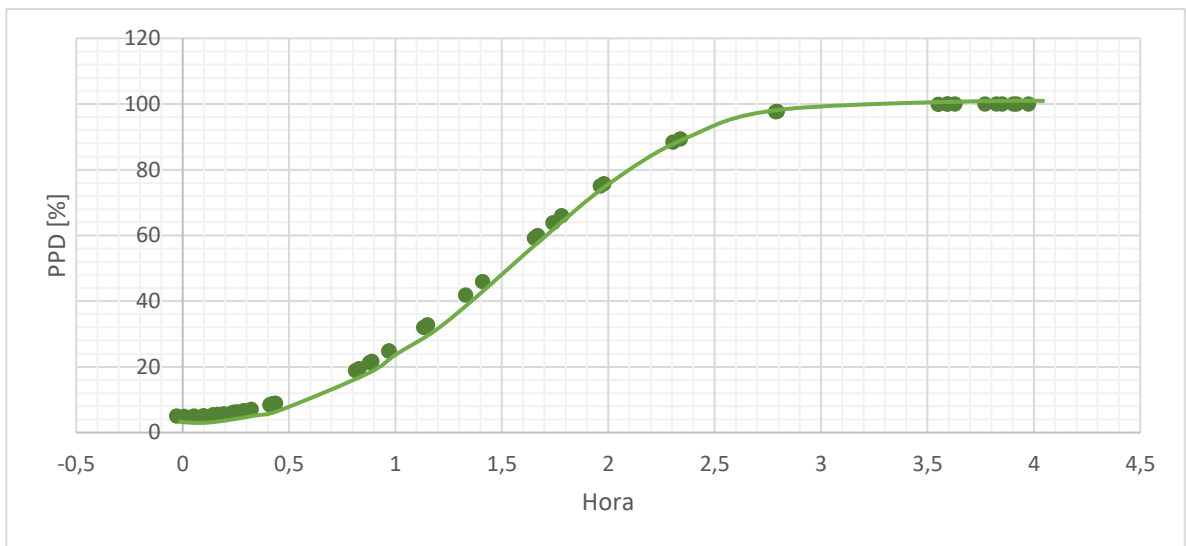
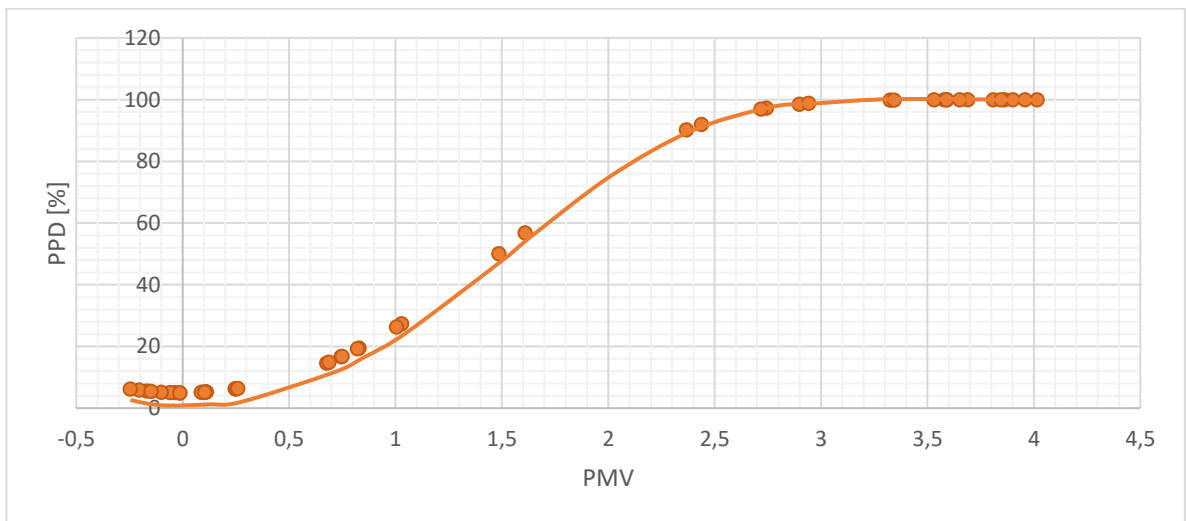


Figura 54. PPD en función del PMV en la avenida Quebrada Seca con carrera 21.



Según Fanger el menor valor del índice PPD será del 5% pues siempre hay alguien inconforme, sin embargo, dice que aquellos lugares donde el PPD sea mayor a un 20% son objeto de inquietud. Para este caso se da en la mayor parte del sector de estudio desde las 7:00 am hasta las 6.00 pm, es decir la jornada laboral de la ciudad, situación altamente preocupante ya que el centro de la ciudad es uno de los lugares de mayor concurrencia.

6. CONCLUSIONES

- La gran masa de hormigón concentrada en los centros de las zonas urbanas, hace que estas tengan características climatológicas diferentes a las de sus alrededores, generando sensaciones térmicas de mayor calor e inconformismo entre los habitantes.
- La isla de calor encontrada en el centro de la ciudad se presenta desde las 6:00 pm hasta las 7:00 am con una diferencia térmica máxima de 2 °C con respecto a otros puntos del sector. Esto debido en gran parte a la inercia térmica de los edificios.
- La zona en la cual se detectó la isla de calor abarca desde la carrera 15 hasta la carrera 19, entre calles 36 y 32 aproximadamente. Este es uno de los sectores con edificaciones de mayor tamaño, con amplio comercio, gran concurrencia de habitantes, varias vías principales de vehículos, los cuales son motivos suficientes para convertir dicho sector en una isla de calor.
- A pesar de que la zona que comprende la isla de calor no presente las mayores temperaturas del aire (29.5°C) entre las 10:00 y 2:00 pm, no quiere decir que en esta zona se tenga una mejor sensación térmica notoria con respecto a otros puntos, pues cabe resaltar que, al haber un gran número de edificios de tamaño considerable alrededor, aumenta la radiación infra roja, generando finalmente sensaciones térmicas de inconformismo en los habitantes
- Se puede afirmar que la sensación de “mucho calor” se da desde la 9:00 am hasta las 4:00 pm, momento en el cual el 100% de los habitantes se encuentra inconforme. Esto se debe a que en dichas horas se presentan radiaciones de casi 2000 W/m² en total y temperaturas de casi 30°C.

- Es evidente como la actividad humana influye en el inconformismo de los habitantes con la sensación térmica, en los habitantes. Puesto que las mejores sensaciones térmicas se presentan entre las 8:00 pm y las 4:00 am, momentos del día en el que no hay sol y el sector no tiene mayor movimiento comercial y de transporte.
- Es de vital importancia que los habitantes de la ciudad de Bucaramanga tengan una conciencia ecológica amplia, que les permita mejorar las condiciones térmicas en las que se encuentran actualmente, mediante el cuidado, la preservación y la implementación de zonas verdes.
- La modelación virtual del sector se realizó mediante volúmenes de control con un tamaño de 3X3X6 [m³]. Donde la distribución de calles, edificios y parques fue satisfactoria, lo cual permitió que se generará una totalidad de 1'091.925 volúmenes de control.
- La distribución de partículas contaminantes en el ambiente mediante el software, da una percepción mayor de la contaminación, la forma en que se distribuye y se deposita en diferentes lugares sin que pueda verse a simple vista, aun cuando son cerca de 400 ppm.
- Este estudio demuestra la importancia de zonas verdes con árboles de gran tamaño, los cuales logran generar una mejor sensación térmica en los habitantes.

7. RECOMENDACIONES

- La disminución de zonas verdes tal como se ha venido desarrollando en la ciudad afecta de manera negativa el confort térmico de la zona urbana, motivo por el cual se invita a la conservación del medio ambiente, la siembra de árboles alrededor de los edificios y la implementación de alternativas que mejoren la temperatura del sector.
- Se recomienda a los nuevos y antiguos edificios intentar implementar paredes o techos verdes, como una de las alternativas para mejorar las condiciones térmicas del sector. A su vez, con un adecuado manejo reforman las fachadas y mejoran la condición térmica del interior.
- Generar conciencia ambiental a todas las personas que concurren el centro de la ciudad para que tomen medios masivos de transporte, eviten la emisión de gases contaminantes que afecten la capa de ozono y a cuidar la naturaleza del sector.
- Reducir lotes de estacionamiento y usar pavimento de materiales porosos
- Promover el uso de lotes baldíos y la mayor densidad de desarrollo urbano.
- Aumentar la educación y actividades de alcance público en la comunidad.

BIBLIOGRAFIA

ACTIONBIOSCIENCE. Islas de Calor en Zonas Urbanas: Ciudades Más Calientes. Disponible en: <http://www.actionbioscience.org/esp/ambiente/voogt.html>. [citado el 25 de marzo de 2016].

CORDERO ORDÓÑEZ, Ximena. Microclima y confort térmico urbano: Análisis sobre la influencia de la morfología del cañón urbano caso de estudio en los barrios el rival y gracia, Barcelona. Barcelona, 2014, 1-110 pp. Trabajo de grado (Master en arquitectura, energía y medio ambiente). Escuela técnica superior de arquitectura de Barcelona.

CÓRDOVA, Karenia. Impacto de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana. Universidad Central de Venezuela. En: Terra Nueva Etapa, vol 42, 2011, 95-122 pp.

HUTTNER, Sebastian, BRUSE, Michael y Dostal Paul. Using ENVI-met to simulate the impact of global warming on the microclimate in central European cities. Geographisches Institut (Environmental Modelling Group). En 5th Japanese-Gutenberg Meeting on Urban Climatology, 2008, 307-312 pp.

IDEAM. Escenarios de cambio climático. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/escenarios-cambio-climatico>. [citado el 7 de abril de 2016].

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Ergonomics of the thermal environment: Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Switzerland: ISO, 2005. (ISO 7730).

LOPEZ, Fernando. PRATS, Cuadrat. El medio ambiente urbano en Zaragoza: observaciones sobre la isla de calor. En: Anales de geografía de la Universidad de Complutense, N°13, 1999, 127-138 pp.

MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES ESPAÑA. Confort térmico: Método de Fanger para su evaluación. Barcelona: Centro de investigación y asistencia técnica, 1983. 1-13 p. : il (NTP 74).

MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES ESPAÑA. El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior. Barcelona: Centro nacional de condiciones de trabajo, 2000. 1-6 p. : il (NTP 549).

PAPPARELLI, Alberto, KURBÁN, Alejandra y CÚNSULO, Mario. Isla de calor y ocupación espacial urbana en San Juan, Argentina: análisis evolutivo. En: Cuadernos de vivienda y urbanismo, Vol. 4, 2011, 110-120 pp.

SB10MAD. Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrid. Disponible en: <http://www.sb10mad.com/ponencias/archivos/a/A033.pdf>. [citado el 30 de Junio de 2016].

SCIELO. Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-7642013000100003&script=sci_arttext. [citado el 7 de abril de 2016]

VITORIA GASTEIZ. Estudio de movilidad y espacio público. Anexo. Metodología confort térmico. Disponible en: <http://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/http/contenidosEstaticos/adjuntos/es/39/61/23961.pdf>. [citado el 5 de agosto de 2016].

ANEXOS

Anexo a. Datos Meteorológico para los días 9 y 10 de julio de 2016, tomados con la estación meteorológica instalada en el edificio Turbay.

Date	Time	Temp	Out	Wind	Wind	Bar
		Out	Hum	Speed	Dir	
9/07/2016	12:00 a. m.	24,2	83	0	S	1007,8
9/07/2016	12:10 a. m.	24,3	83	0,9	S	1007,9
9/07/2016	12:20 a. m.	24,3	83	0,9	S	1007,9
9/07/2016	12:30 a. m.	24,4	83	0,4	SSE	1007,8
9/07/2016	12:40 a. m.	24,3	82	0,4	E	1007,6
9/07/2016	12:50 a. m.	24,4	81	0,4	ESE	1007,4
9/07/2016	1:00 a. m.	24,6	81	0,4	S	1007,4
9/07/2016	1:10 a. m.	24,6	80	0	E	1007,1
9/07/2016	1:20 a. m.	24,7	80	0,4	E	1006,9
9/07/2016	1:30 a. m.	24,7	76	0,9	E	1006,8
9/07/2016	1:40 a. m.	24,8	74	0,9	ESE	1006,8
9/07/2016	1:50 a. m.	24,8	74	0	ESE	1006,5
9/07/2016	2:00 a. m.	24,5	76	0	NNE	1006,5
9/07/2016	2:10 a. m.	24,1	85	0,4	W	1006,5
9/07/2016	2:20 a. m.	23,6	87	0,4	S	1006,4
9/07/2016	2:30 a. m.	23,2	88	0,4	SSE	1006,3
9/07/2016	2:40 a. m.	23	87	0,4	SSE	1006,3
9/07/2016	2:50 a. m.	23,1	84	0,4	S	1006,3
9/07/2016	3:00 a. m.	23,1	85	0	SSW	1006,2
9/07/2016	3:10 a. m.	23	84	0	S	1006,3
9/07/2016	3:20 a. m.	22,9	84	0	SW	1006,3
9/07/2016	3:30 a. m.	22,9	85	0	WSW	1006,2
9/07/2016	3:40 a. m.	22,9	85	0	WSW	1006,2
9/07/2016	3:50 a. m.	22,9	84	0	W	1006,1
9/07/2016	4:00 a. m.	22,8	84	0	W	1006
9/07/2016	4:10 a. m.	22,8	84	0,4	N	1006
9/07/2016	4:20 a. m.	22,7	84	0,4	ENE	1006,2
9/07/2016	4:30 a. m.	22,7	83	0	ENE	1006
9/07/2016	4:40 a. m.	22,6	82	0,4	NNW	1006,1
9/07/2016	4:50 a. m.	22,7	82	0,4	NNW	1006,1

9/07/2016	5:00 a. m.	22,8	80	0,9	NNE	1006,2
9/07/2016	5:10 a. m.	22,6	79	1,3	NNE	1006,3
9/07/2016	5:20 a. m.	22,4	80	0,4	NNW	1006,4
9/07/2016	5:30 a. m.	22,2	84	0,4	WNW	1006,4
9/07/2016	5:40 a. m.	22	85	0	WNW	1006,6
9/07/2016	5:50 a. m.	22	86	0,4	W	1006,6
9/07/2016	6:00 a. m.	22,1	86	0	SSE	1006,8
9/07/2016	6:10 a. m.	22	86	0	SSE	1007
9/07/2016	6:20 a. m.	21,9	86	0	SSE	1007,3
9/07/2016	6:30 a. m.	22,1	85	0,4	SSE	1007,4
9/07/2016	6:40 a. m.	22,2	84	0,4	SSE	1007,3
9/07/2016	6:50 a. m.	22,4	83	0	SW	1007,4
9/07/2016	7:00 a. m.	22,7	81	0	S	1007,4
9/07/2016	7:10 a. m.	22,8	80	0	SSE	1007,5
9/07/2016	7:20 a. m.	22,9	80	0,4	W	1007,7
9/07/2016	7:30 a. m.	23	80	0,4	WSW	1007,6
9/07/2016	7:40 a. m.	23,2	79	0,4	WSW	1007,5
9/07/2016	7:50 a. m.	23,3	77	0,4	S	1007,5
9/07/2016	8:00 a. m.	23,6	74	1,3	S	1007,6
9/07/2016	8:10 a. m.	23,9	73	0,4	S	1007,7
9/07/2016	8:20 a. m.	24,3	71	0,4	S	1007,6
9/07/2016	8:30 a. m.	24,6	68	0,9	W	1007,4
9/07/2016	8:40 a. m.	25	68	0,9	W	1007,2
9/07/2016	8:50 a. m.	25,8	67	0,9	W	1007,2
9/07/2016	9:00 a. m.	26,9	64	0,9	S	1007,2
9/07/2016	9:10 a. m.	27,6	60	1,3	S	1007,1
9/07/2016	9:20 a. m.	28,1	58	1,3	S	1007
9/07/2016	9:30 a. m.	28,3	57	2,2	S	1006,9
9/07/2016	9:40 a. m.	28,6	58	1,3	S	1006,9
9/07/2016	9:50 a. m.	29,1	57	0,9	SSE	1006,7
9/07/2016	10:00 a. m.	29,6	56	0,4	S	1006,5
9/07/2016	10:10 a. m.	30,1	55	0,4	W	1006,4
9/07/2016	10:20 a. m.	30,4	54	0,4	SSE	1006,3
9/07/2016	10:30 a. m.	30,9	50	0,4	SSE	1006,1
9/07/2016	10:40 a. m.	31,3	47	0,9	SSE	1005,8
9/07/2016	10:50 a. m.	30,7	48	0,9	W	1005,7
9/07/2016	11:00 a. m.	31,4	46	0,9	S	1005,4
9/07/2016	11:10 a. m.	32	45	0,9	SSE	1005,3
9/07/2016	11:20 a. m.	31,1	60	4,5	NNE	1005,1
9/07/2016	11:30 a. m.	29,9	62	4,9	N	1005

9/07/2016	11:40 a. m.	29,4	63	5,4	N	1004,9
9/07/2016	11:50 a. m.	29,2	64	4,9	NNW	1004,7
9/07/2016	12:00 p. m.	29,2	63	4,9	N	1004,6
9/07/2016	12:10 p. m.	29,3	63	4,5	NNW	1004,4
9/07/2016	12:20 p. m.	29,3	63	5,4	NNE	1004,3
9/07/2016	12:30 p. m.	29,3	65	5,8	NNE	1004,3
9/07/2016	12:40 p. m.	29,2	66	4,9	N	1004,2
9/07/2016	12:50 p. m.	28,9	67	5,4	NNW	1004,1
9/07/2016	1:00 p. m.	28,9	67	4,9	N	1004
9/07/2016	1:10 p. m.	29,1	67	4,9	NNE	1003,8
9/07/2016	1:20 p. m.	29,2	67	5,8	NNE	1003,6
9/07/2016	1:30 p. m.	28,8	67	5,8	NE	1003,4
9/07/2016	1:40 p. m.	28,6	67	5,4	NE	1003,2
9/07/2016	1:50 p. m.	29	66	5,4	N	1003
9/07/2016	2:00 p. m.	29	66	5,8	NNE	1002,9
9/07/2016	2:10 p. m.	28,8	67	4,9	N	1002,8
9/07/2016	2:20 p. m.	29,1	65	4,5	N	1002,8
9/07/2016	2:30 p. m.	28,8	67	5,8	NNE	1002,8
9/07/2016	2:40 p. m.	28,7	66	4,5	NNE	1002,8
9/07/2016	2:50 p. m.	28,8	68	4,9	NNE	1002,9
9/07/2016	3:00 p. m.	28,7	68	5,4	NNE	1002,9
9/07/2016	3:10 p. m.	28,5	69	4,9	N	1002,7
9/07/2016	3:20 p. m.	28,7	68	4,9	NNE	1002,6
9/07/2016	3:30 p. m.	28,7	67	4,5	NNE	1002,5
9/07/2016	3:40 p. m.	28,6	67	5,4	NNE	1002,5
9/07/2016	3:50 p. m.	28,6	67	4,5	NNE	1002,6
9/07/2016	4:00 p. m.	28,6	68	5,4	NNE	1002,5
9/07/2016	4:10 p. m.	28,4	69	4,9	NNE	1002,4
9/07/2016	4:20 p. m.	28,4	69	4,9	NNE	1002,4
9/07/2016	4:30 p. m.	28,4	70	4,9	N	1002,3
9/07/2016	4:40 p. m.	28,1	71	4,9	N	1002,3
9/07/2016	4:50 p. m.	28,3	70	5,4	N	1002,4
9/07/2016	5:00 p. m.	28,2	72	4,9	N	1002,6
9/07/2016	5:10 p. m.	28,3	71	4,5	NNE	1002,8
9/07/2016	5:20 p. m.	28,1	73	4	N	1003
9/07/2016	5:30 p. m.	27,9	74	4,5	N	1003,2
9/07/2016	5:40 p. m.	27,6	76	4	N	1003,2
9/07/2016	5:50 p. m.	27,5	77	3,6	N	1003,6
9/07/2016	6:00 p. m.	27,2	80	4	NNE	1003,7
9/07/2016	6:10 p. m.	26,8	81	4,5	NE	1003,7

9/07/2016	6:20 p. m.	26,6	81	4,5	NNE	1003,6
9/07/2016	6:30 p. m.	26,6	82	3,1	NE	1003,7
9/07/2016	6:40 p. m.	26,3	84	3,1	NE	1003,7
9/07/2016	6:50 p. m.	26,2	84	3,1	NE	1004
9/07/2016	7:00 p. m.	26,1	84	2,7	NE	1004,4
9/07/2016	7:10 p. m.	26,1	85	2,7	N	1004,7
9/07/2016	7:20 p. m.	25,9	85	1,3	NE	1004,8
9/07/2016	7:30 p. m.	25,9	85	1,3	ENE	1004,8
9/07/2016	7:40 p. m.	25,8	85	0,9	NE	1005
9/07/2016	7:50 p. m.	25,9	86	0,9	N	1005,2
9/07/2016	8:00 p. m.	25,9	85	0,9	NE	1005,2
9/07/2016	8:10 p. m.	25,8	86	0,9	NNE	1005,5
9/07/2016	8:20 p. m.	25,8	86	0,9	N	1005,8
9/07/2016	8:30 p. m.	25,7	86	0,9	N	1005,9
9/07/2016	8:40 p. m.	25,7	86	0	W	1006
9/07/2016	8:50 p. m.	25,8	85	0,4	NNE	1006,1
9/07/2016	9:00 p. m.	25,9	85	0,4	ENE	1006,2
9/07/2016	9:10 p. m.	26,1	84	0	W	1006,2
9/07/2016	9:20 p. m.	26,1	86	0,4	W	1006,5
9/07/2016	9:30 p. m.	25,9	87	0,4	SSW	1006,7
9/07/2016	9:40 p. m.	25,6	79	3,1	SSE	1007
9/07/2016	9:50 p. m.	25	86	1,8	S	1007,1
9/07/2016	10:00 p. m.	24	91	1,3	SSE	1007,4
9/07/2016	10:10 p. m.	22,9	92	3,6	S	1008
9/07/2016	10:20 p. m.	21,3	95	2,2	W	1008,1
9/07/2016	10:30 p. m.	20,3	97	0,4	ENE	1007,9
9/07/2016	10:40 p. m.	20,2	97	0,9	N	1007,6
9/07/2016	10:50 p. m.	20,2	98	0,9	E	1007,3
9/07/2016	11:00 p. m.	20,5	98	0,4	W	1007,3
9/07/2016	11:10 p. m.	20,4	98	0	W	1007,3
9/07/2016	11:20 p. m.	20,6	98	0	W	1007,3
9/07/2016	11:30 p. m.	20,6	98	0,9	W	1007,2
9/07/2016	11:40 p. m.	20,4	98	0,9	S	1007,1
9/07/2016	11:50 p. m.	20,4	98	1,3	S	1007

Anexo b. Mapas térmicos del centro de la ciudad de Bucaramanga, hora a hora durante el día 10 de julio de 2016.

