

**Análisis de Islas de Calor Urbanas mediante imágenes satelitales e información
georreferenciada en la ciudad de Bucaramanga, su materialidad y recomendaciones**

Luz Adriana Gualdrón Díaz

Diseñadora Industrial

Trabajo de grado para optar el título de Magíster en Arquitectura

Directora

Ing. Quím. Paolo Andrea Moreno Yáñez

Doctora en Ingeniería Química

Codirectora

Arq. Erika Tatiana Ayala García

Doctora en Teoría e Historia de la Arquitectura

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Maestría en Arquitectura

2023

Agradecimiento

A Dios fuente de amor e inspiración en mi vida. A mi familia, por el apoyo incondicional, a mi padre que me guio por este camino y que sonríe desde esa morada que nos construye en el cielo. Agradezco con todo el corazón a mis dos Marías, Angélica y Victoria, a mi madre por su sabiduría, a mis hermanas las Gudi, el gran matriarcado y a mi t o Julio César.

Un agradecimiento sincero a mi directora de Proyecto la Ingeniera Paolo Andrea Moreno, a mi codirectora la Arquitecta Erika Ayala; a mis compañeros de maestría y a cada uno de los que apoyaron el proceso durante estos tres años, en especial a María Esperanza y a Johanna Rojas.

Contenido

Introducción	13
1. Selección de material para la reducción de islas de calor en las zonas peatonales de la ciudad de Bucaramanga.....	16
1.1 Planteamiento del problema	16
1.2 Objeto de estudio	27
1.3 Formulación del Problema.....	28
1.4 Justificación	28
1.5 Hipótesis	29
1.6 Objetivos.....	30
1.6.1 Objetivo general.....	30
1.6.2 Objetivos específicos	30
2. Marco referencial.....	30
2.1 Marco teórico.....	30
2.1.1 Islas de calor	30
2.1.2 Microclima.....	32
2.1.3 Absorción térmica.....	35
2.1.4 Influencia de las políticas internacionales en el plan de desarrollo nacional	37
2.1.5 Comercialización de materiales en el país.	38
2.2 Marco Conceptual.....	39
2.3 Marco legal y normativo.....	40
3. Método.....	42

3.1 Fase uno: identificación de microclimas que evidencian mayor absorción térmica en el territorio urbano.....	43
3.2 Fase dos: análisis de las propiedades requeridas para que un material se comporte como reductor de absorción térmica	43
3.2.1 Estrategia de búsqueda.....	44
3.2.2 Palabras claves para la búsqueda	44
3.2.3 Criterios de inclusión	45
3.2.4 Criterios de exclusión	45
3.2.5 Evaluación de calidad de los artículos preseleccionados.....	45
3.3 Fase tres: identificación de materiales existentes en la región que reúnen las propiedades asociadas a la reducción de absorción térmica.....	46
4. Resultados.....	47
4.1 Fase uno: identificación de microclimas que evidencian mayor absorción térmica en el territorio urbano.....	47
4.1.1 Caracterización de la zona objeto de estudio	47
4.1.2 Detección de Islas de calor y NVDI a partir de imágenes Landsat 8	55
4.2 Propiedades asociadas a los materiales reductores de absorción térmica	65
4.3 Materiales existentes en la región que reúnen las propiedades asociadas a la reducción de absorción térmica	71
4.3.1 Zona 1 Comuna Norte.....	75
4.3.2 Zona 2 Comuna Occidental	77
4.3.3 Zona 3 Comuna Occidental	79
4.3.4 Zona 4 Comuna Centro.....	81

4.3.5	Zona 5 Comuna Centro – La Concordia	82
4.3.6	Zona 6 Comuna La Concordia	84
4.3.7	Zona 7 Comuna Sur occidente	86
4.4	Propiedades térmicas de los materiales de construcción	90
5.	Conclusiones.....	100
6.	Recomendaciones	102
	Referencias.....	104
	Apéndices.....	123

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Categorías de estudio</i>	17
Tabla 2. <i>Conceptos identificados en la categoría ambiental</i>	37
Tabla 3. <i>Palabras claves para la búsqueda</i>	44
Tabla 4. <i>Evaluación de calidad</i>	46
Tabla 5. <i>Promedios Climatológicos de Bucaramanga entre 1981-2010 y 2015-2020</i>	53
Tabla 6. <i>Clasificación Caldas Lang</i>	54
Tabla 7. <i>Clasificación Lang</i>	54
Tabla 8. <i>Procedimiento para descarga y análisis de imágenes Landsat 8</i>	56
Tabla 12. <i>División Política Urbana de Bucaramanga</i>	59
Tabla 10. <i>Criterios de evaluación de calidad</i>	66
Tabla 11. <i>Estrategias y resultados de publicaciones</i>	68
Tabla 12. <i>Análisis de zonas por uso del suelo, habitantes y árboles por hectárea</i>	88
Tabla 13. <i>Propiedades opto-térmicas de los materiales de construcción</i>	90

Lista de figuras

Figura 1. <i>Cambio en la temperatura anual media 1901-2012</i>	19
Figura 2. <i>Cambio de temperatura en superficie en distintos escenarios de emisión.....</i>	20
Figura 3. <i>Cambio de la temperatura media global.....</i>	21
Figura 4. <i>Porcentajes de las emisiones mundiales de GEI en megatoneladas de CO2.</i>	22
Figura 5. <i>Diferencia de temperaturas medias anuales, 1976-2005 vs 2071-2100.....</i>	23
Figura 6. <i>Hectáreas deforestadas. Paralelo 2016 – 2017.</i>	24
Figura 7. <i>Hectáreas deforestadas por departamento.</i>	25
Figura 8. <i>Proyección de la diferencia de temperatura 1976-2005/2071-2100 en Santander</i>	26
Figura 9. <i>Efecto Isla de Calor Urbano</i>	32
Figura 10. <i>Radiación solar y efectos en la superficie terrestre</i>	39
Figura 11. <i>Secuencia del proceso de investigación</i>	42
Figura 12. <i>Ubicación de Bucaramanga dentro del territorio colombiano.....</i>	48
Figura 13. <i>Temperatura Media Bucaramanga 2015-2020.....</i>	49
Figura 14. <i>Temperatura Máxima Vs. Temperatura Mínima media Anual 2015-2020</i>	50
Figura 15. <i>Radiación Mensual Media Anual 2015-2020.....</i>	51
Figura 16. <i>Humedad Relativa Media Mensual Anual 2015-2020</i>	52
Figura 17. <i>Velocidad Media del Viento Mensual 2015-2020</i>	52
Figura 18. <i>Clasificación Caldas-Lang para Bucaramanga.....</i>	55
Figura 19. <i>Compilado de datos para geoprocesamiento de imágenes Landsat 8. 2015-2020....</i>	58
Figura 20. <i>Comunas - División Política Urbana de Bucaramanga</i>	60
Figura 21. <i>Islas de Calor en Bucaramanga del 2015 al 2020.....</i>	61
Figura 22. <i>Superposición de Islas de Calor en Bucaramanga del 2015 al 2020.</i>	63

Figura 23. <i>Zonas con mayor afectación de ICU en Bucaramanga del 2015 al 2020</i>	64
Figura 24. <i>Años de publicación de los documentos</i>	65
Figura 25. <i>Países de publicación de los documentos considerados</i>	66
Figura 26. <i>Puntuación de publicaciones según criterios de la Tabla 13</i>	67
Figura 27. <i>Zonas con arborización Vs. ICU, Bucaramanga 2015 al 2020.</i>	72
Figura 28. <i>NVDI Bucaramanga 2015-2020.</i>	74
Figura 29. <i>Zona 1 comuna Norte. Ubicación, isla de calor y uso del suelo.</i>	76
Figura 30. <i>Caracterización de materiales Zona 1.</i>	76
Figura 31. <i>Arborización Vs. ICU zona 1.</i>	77
Figura 32. <i>Zona 2 comuna Occidental. Ubicación, ICU y uso del suelo.</i>	78
Figura 33. <i>Caracterización de materiales Zona 2.</i>	78
Figura 34. <i>Arborización Vs. ICU para la zona 2, zona 3, zona 4, zona 5 y zona 6</i>	79
Figura 35. <i>Zona 3 comuna Occidental. Ubicación, ICU y uso del suelo.</i>	80
Figura 36. <i>Caracterización de materiales zona 3.</i>	80
Figura 37. <i>Zona 4 comuna Centro. Ubicación, ICU y uso del suelo.</i>	81
Figura 38. <i>Caracterización de materiales zona 4.</i>	82
Figura 39. <i>Zona 5 comuna Centro - la Concordia. Ubicación, ICU y uso del suelo</i>	83
Figura 40. <i>Caracterización de materiales zona 5</i>	83
Figura 41. <i>Infraestructura Vial Zona 5</i>	84
Figura 42. <i>Zona 6 comuna la Concordia, ubicación, ICU y uso del suelo.</i>	85
Figura 43. <i>Caracterización de materiales zona 6.</i>	85
Figura 44. <i>Zona 7 comuna Sur-occidente, ubicación, ICU y uso del suelo.</i>	86
Figura 45. <i>Caracterización de materiales zona 7.</i>	87

Figura 46. <i>Arborización Vs. ICU zona 7.</i>	87
Figura 47. <i>Caracterización de materiales por zonas.</i>	88
Figura 48. <i>Zona 3 máxima temperatura por ICU en Bucaramanga</i>	89
Figura 49. <i>Categoría 1: materiales en pavimentos.</i>	94
Figura 50. <i>Categoría 2: materiales en andenes.</i>	95
Figura 51. <i>Categoría 3: materiales en cubiertas.</i>	96
Figura 52. <i>Imágenes infrarrojas térmicas</i>	96
Figura 53. <i>Valores de absortancia y emitancia superficial.</i>	97
Figura 54. <i>SRI de Superficies Horizontales en 3 categorías: pavimentos, andenes y cubiertas.</i> 98	
Figura 55. <i>Comportamiento de materiales fríos</i>	98

Lista de apéndices

Apéndice A. <i>Temperatura 2015-2020 para Bucaramanga</i>	123
Apéndice B. <i>Radiación 2015-2020 para Bucaramanga</i>	131
Apéndice C. <i>Humedad relativa 2015-2020</i>	135
Apéndice D. <i>Vientos 2015-2020</i>	139
Apéndice E. <i>Geoprocesamiento de imágenes landsat</i>	140
Apéndice F. <i>Preselección de publicaciones</i>	147
Apéndice G. <i>Evaluación de las publicaciones</i>	151
Apéndice H. <i>Caracterización de Materiales</i>	153
Apéndice I. <i>Caracterización de materiales por zonas afectadas por ICU en Bucaramanga</i> ...	155
Apéndice J. <i>Imágenes de sobrevuelo con dron zona 2 y zona 3</i>	156
Apéndice K. <i>Análisis Zona 3: máxima afectación por ICU</i>	158

Resumen

El aumento de temperatura en las ciudades, producto del exceso de gases de efecto invernadero, las actividades humanas cotidianas en el espacio, el retiro indiscriminado de la capa vegetal y el uso de materiales inadecuados, incentiva la búsqueda y el desarrollo de estrategias que posibiliten la generación de espacios confortables frente a las zonas de acumulación de calor. Por lo tanto, se intentará por medio del análisis de imágenes satelitales y el cruce de información georreferenciada establecer islas de calor en la ciudad de Bucaramanga a fin de analizar la materialidad de dichas islas para recomendar un material con propiedades opto-térmicas, permitiendo alta reflexión solar y baja absorción radiativa, para mitigar las islas de calor urbano (ICU) en la ciudad.

Palabras clave: isla de calor urbano (ICU), materiales fríos, índice de reflectancia solar, bioclimática, inercia térmica

Abstract

The increase of temperature in cities, as a result of excess greenhouse gases, daily human activities in public space, the indiscriminate removal of the vegetation layer, and the use of inappropriate materials encourage the research to create strategic comfortable spaces in front of areas of heat accumulation. Therefore, through the analysis of satellite images and the crossing of geo-referenced information, heat islands will be identified in the city of Bucaramanga in order to analyze the materiality of these heat islands and recommend a material with Opto-thermal properties, allowing high solar reflection and low radiative absorption, to mitigate urban heat islands (ICU) in the city.

Keywords: urban heat island, cold materials, solar reflectance index, bioclimatic, thermal inertia

Introducción

Los microclimas son el resultado de la convergencia de diferentes factores atmosféricos que afectan un sector; como puede ser el surgimiento de las islas de calor urbanas, debido a la falta de idoneidad en las dinámicas y materiales de construcción, que dejan de lado el confort de la población, la dimensión ambiental y la sostenibilidad en las urbes. Así que, es preciso pensar en estrategias sostenibles que contribuyan a la reducción de las islas de calor y que estas se desarrollen con miras al mejoramiento de la calidad de vida de la población que reside o frecuenta la zona impactada.

Por lo anterior, esta investigación es el producto del análisis que orienta a establecer materiales que contribuyan al mejoramiento ambiental de las zonas de espacio público, específicamente de las condiciones urbanas del sector central en Bucaramanga (Santander-Colombia) que concentran microclimas. La ciudad se encuentra ubicada al Nor-orient de Colombia con latitud: 7°5'59.99" N, Longitud 73°6'36" W y Altitud de 970 msnm, con una temperatura media anual de 23.7 °C, vientos predominantes provenientes del Norte en un 41% con una velocidad media mensual de 1.77 m/s. Debido a la concentración de microclimas en la ciudad, se contempla el desarrollo de estrategias para la mitigación de las Islas de Calor Urbano (ICU), que procuren el mejoramiento de la calidad de vida de las personas del sector.

Asimismo, se sugiere la búsqueda de alternativas a micro-escala, para dar solución, desde la materialidad, en cuanto a cubiertas horizontales y verticales, en las urbes que propendan al uso eficiente de recursos, viviendas confortables y espacios urbanos agradables. Finalmente, se considera la generación de procesos ecoefectivos donde la fusión entre el comercio y el público que lo sustenta sea el factor de cambio, con una mejora continua de los procesos medioambientales, sociales y culturales que intervienen en la comercialización de productos (Braungart y

McDonough, 2010); máxime cuando el aprovechamiento de los recursos es vital para mermar el impacto, rescatar la flora y la fauna en vía de extinción y preservar los recursos hídricos.

Entonces, se aborda el problema a partir de la revisión de Islas de Calor Urbano – ICU en la ciudad, con el fin de detectar las variables que intervienen directa o indirectamente en la generación de microclimas y proponer una solución acertada en el marco del desarrollo de estrategias y diseños adecuados. A partir de imágenes satelitales Landsat 8 sobre Bucaramanga se realiza la teledetección a mesoescala, y en correlación a los datos climatológicos obtenidos por el IDEAM para los años 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020. De ahí, se busca explorar dentro del territorio las zonas con mayor afectación por ICU, de las que se identifican siete con mayor impacto, para realizar valoración y desde el análisis de superficies horizontales se encamine la propuesta material que se comporte como reductor de absorción térmica.

Finalmente, se presenta la identificación de materiales existentes en la región que reúnen las propiedades asociadas a la reducción de absorción térmica y que se ciñen a los requerimientos de seguridad, accesibilidad, calidad, sostenibilidad y economía para la construcción y el diseño del espacio público de Bucaramanga. De ahí que para superficies horizontales debe hacerse con materiales fríos (de baja capacidad calorífica y baja transmitancia térmica, es decir materiales de baja inercia térmica) que son los encargados de absorber y liberar menor temperatura. Mientras que para los pavimentos se recomiendan recubrimientos con un índice de reflexión solar alto para las superficies asfálticas y en concreto.

Se considera, entonces, que las propiedades relevantes de los materiales a fin de mitigar las ICU se debe centrar en las propiedades térmicas, exclusivamente en la reflexión o emitancia térmica desde su rango de albedo y la absorción térmica. Además, la revisión de literatura especializada indica que parte de las estrategias para la reducción de los microclimas tienen en

cuenta la arborización de andenes, las cubiertas verdes en edificaciones, el cambio de materiales en vías a pavimento permeable y materiales en edificaciones y senderos peatonales que permitan la reflexión y contribuyan a la disminución de ICU.

1. Selección de material para la reducción de islas de calor en las zonas peatonales de la ciudad de Bucaramanga

1.1 Planteamiento del problema

Los cambios climáticos repentinos producto del modelo de desarrollo llevado a cabo desde finales del siglo XVIII suponen un preocupante panorama para los próximos años que impactarán de manera negativa las especies y los sistemas del planeta; los efectos serán fuertes olas de calor en todas las ciudades, producto de los gases de efecto invernadero (Guo, et ál., 2018).

Años de desarrollo industrializado alejado de una dinámica sostenible y amigable con el ambiente han derivado en el riesgo de las condiciones necesarias para el buen desarrollo de las generaciones futuras. El porcentaje de contaminación en el suelo, el aire y el agua ha ascendido a tal punto que los polos se deshielan, las especies se extinguen, las lluvias ácidas son frecuentes y los problemas bronco-respiratorios en la población mundial aumentan (Organización Mundial de la Salud, 2006).

El impacto generado por la forma en que se producen y consumen determinados productos ha hecho que se presente un creciente interés en el desarrollo de soluciones para comprender mejor los sistemas y procesos de desarrollo de dichos productos; de esta forma se ha buscado responder a la amenaza latente de los costos medioambientales que han llevado a diversos ecosistemas al borde del colapso, el cambio climático y el detrimento del planeta.

La problemática ha incidido en gran parte en el tejido urbano, al provocar microclimas o islas de calor en sectores puntuales, los cuales afectan la calidad de vida de quienes residen en las áreas afectadas.

Ante la situación descrita, la investigación objeto del presente trabajo irá orientada a recomendar materiales que contribuyan al mejoramiento ambiental de las zonas de espacio público con mayor absorción térmica en Bucaramanga.

La disposición de rangos o categorías dentro del estudio está dada desde el tema ambiental, en relación con el calentamiento global, dentro del espacio que involucra el territorio urbano de Bucaramanga y sus zonas con mayor problemática de absorción térmica que generan islas de calor, desde variables que serán estudio dentro del presente trabajo. En la Tabla 1 se muestran las diferentes categorías de análisis que serán abordadas en los componentes de ambiente, espacio y materiales.

Tabla 1. *Categorías de estudio*

Ambiente	Espacio	Materiales
Gases de efecto invernadero GEI	Territorio Urbano Bucaramanga	Caracterización de materiales horizontales existentes
Islas de Calor Urbano ICU	Espacio Público	Recomendación de material

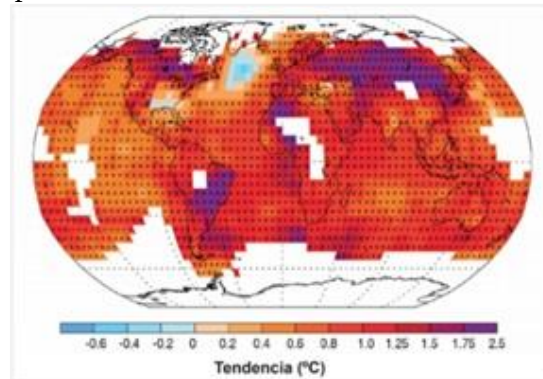
Resulta oportuna la revisión de aspectos ambientales relacionados con la generación de gases de efecto invernadero y la identificación de materiales inorgánicos que generan el incremento de la temperatura al punto de generar microclimas en las urbes; a partir de la comprensión de esos fenómenos, se podrá profundizar en el conocimiento del caso puntual de estudio dentro del territorio, y de esa forma proceder a su intervención a partir de elementos naturales que inspiren el rediseño formal de equipamientos dispuestos dentro del espacio urbano.

Desde la denominada revolución industrial, el desmesurado crecimiento ha llevado al uso extremo de los recursos naturales y al desgaste de lo que se creía eterno y renovable. Cada fue más frecuente el uso de materias primas derivadas del petróleo, sin asegurar una disposición final amigable con el ambiente (Miramontes Carballada, 2020). Esa situación ha generado crecientes

emisiones de vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonados, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre denominados gases de efecto invernadero, conocidos como GEI, como se señaló en el protocolo de Kyoto (Naciones Unidas, 1998). La acumulación masiva de esos gases genera un sobrecalentamiento progresivo del planeta, afecta el desarrollo del ciclo natural y amenaza con generar el trastorno completo del sistema.

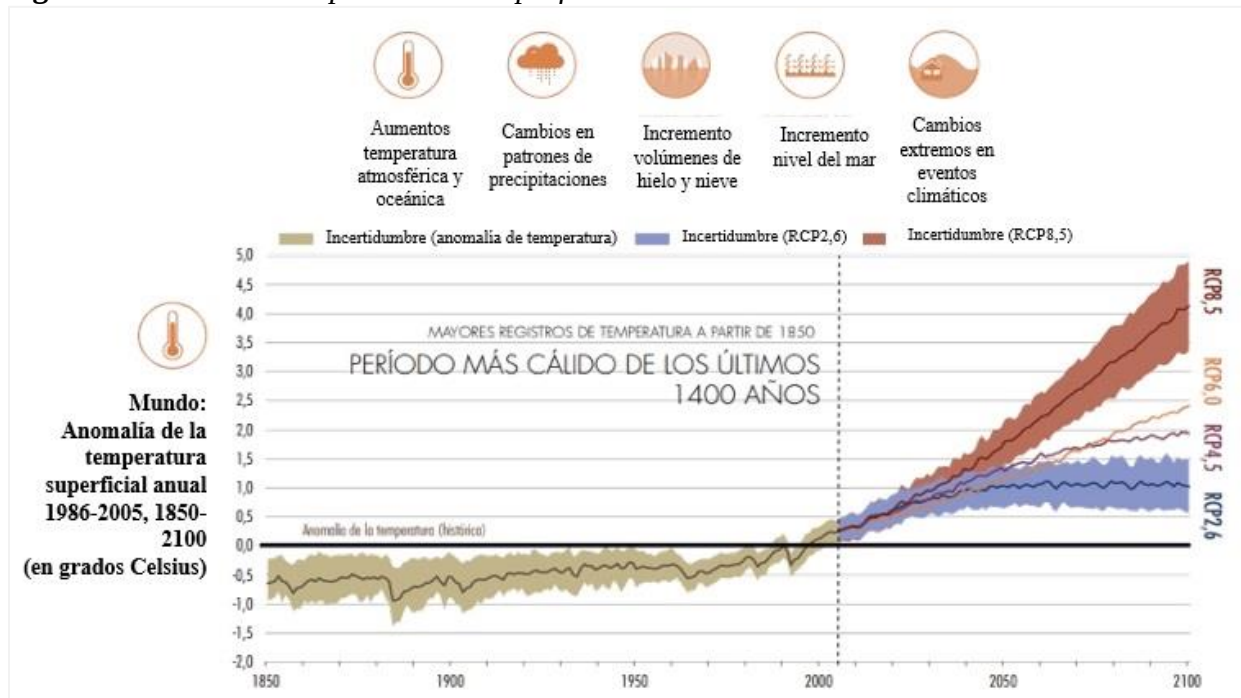
Mediante el protocolo de Kyoto se definieron medidas concretas, enfocadas en la reducción de los GEI (Naciones Unidas, 1998). En el mismo sentido concluyó el denominado COP15 objeto del acuerdo de Copenhague en 2009 y posteriormente ratificado en los objetivos del COP21 en el acuerdo de París en 2015, que busca la reducción de 1,5°C respecto a los niveles preindustriales (Naciones Unidas, 2015). En el marco de este acuerdo, Colombia se comprometió a reducir el 20% de sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para 2030 frente al inventario de emisiones nacionales de 2010 y aumentar esa reducción a un 30% si recibe el debido apoyo internacional (WWF, 2018). Entre tanto, los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS definidos por las Naciones Unidas incluyen en el número 12 Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2021a) y en el número 13 Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2021b).

Desde que se conformó el Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático (conocido por su sigla IPCC en inglés), se han realizado múltiples informes sobre fenómenos como el aumento de temperatura de la superficie de la tierra y en los océanos, la pérdida del manto de hielo en los glaciales y el aumento del nivel del mar en 0,19 metros desde 1901 hasta 2010 (IPCC, 2013), como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. *Cambio en la temperatura anual media 1901-2012*

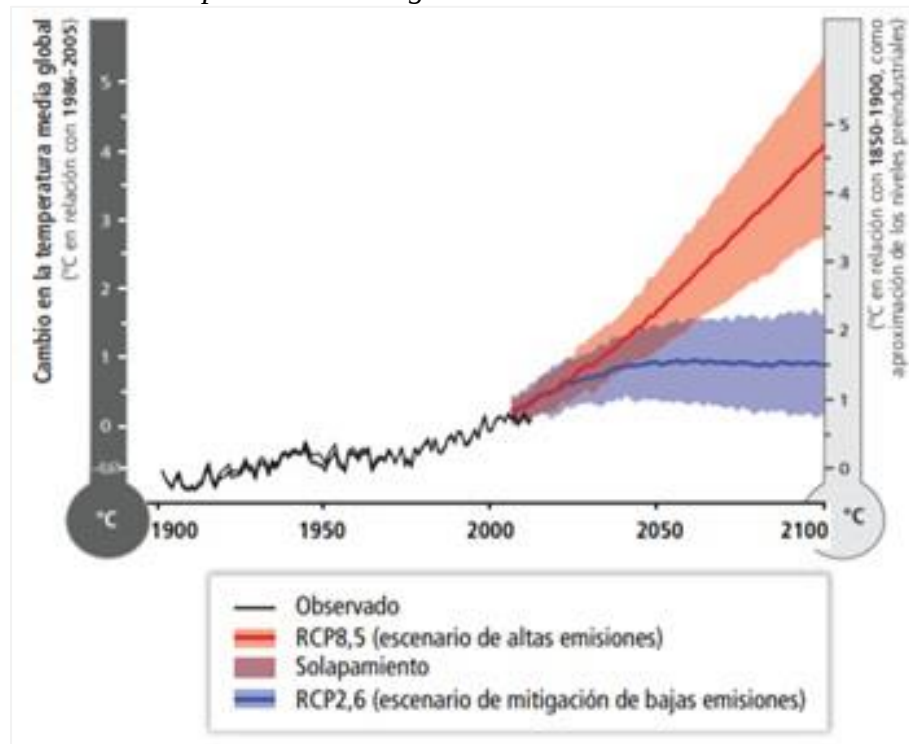
Tomado de OECC, Fundación Bioiversidad, AEMET y CENEAM (2013, p. 5)

Puede notarse en la Figura 1 que el calentamiento es generalizado, sin importar el lugar en donde se generan los GEI; existen zonas del planeta que han padecido mayor calentamiento. El cambio del clima entre 1850 y 2100 permitió elaborar proyecciones basadas en las denominadas Sendas Representativas de Concentración (en inglés, *Representative Concentration Pathways*), referidas en términos del Factor Radioactivo -FR, que se expresa en W/m^2 y se refleja en la emisión de CO_2 en partes por millón -ppm dentro de la atmósfera (Arnell, et ál., 2019). Como se muestra en la Figura 2, dichas RCP oscilan entre 2.6 W/m^2 a 8.5 W/m^2 y permiten proyectar escenarios para 2100.

Figura 2. Cambio de temperatura en superficie en distintos escenarios de emisión

Tomado de Bárcena, et ál. (2018, p. 17).

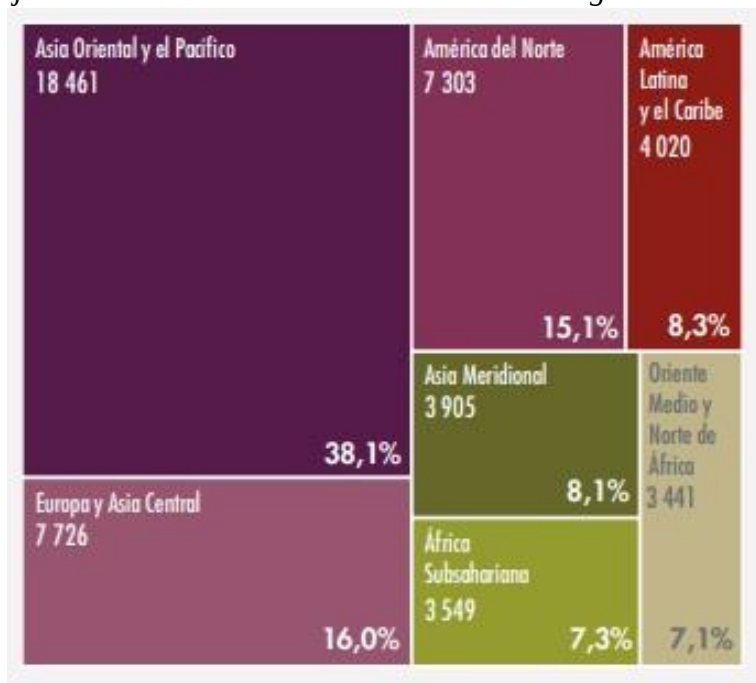
En la Figura 2 el escenario de color azul corresponde a un descenso de la temperatura (RCP 2.6 W/m²), mientras que el escenario pesimista en color rojo es el que se alcanzaría si se mantiene el ritmo actual de emisión (8.5 W/m²). Los dos grupos de trabajo del IPCC proyectan el aumento de la temperatura media de la superficie terrestre hasta aproximadamente 5°C, lo que llevará a disminuir la escorrentía y la humedad del suelo (ver Figura 3).

Figura 3. *Cambio de la temperatura media global*

Tomado de Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Fundación Biodiversidad, OECC, AEMET y CENEAM (2014, p. 35).

El panorama en América central y del sur sigue el mismo curso, a pesar de que, como puede verse en la Figura 4, comparado con las potencias industriales, esta región no alcanza el 10% de emisiones totales de GEI (Bárcena, et ál., 2018).

Esta situación confirma la necesidad apremiante de generar estrategias de adaptación al cambio, implementación de energías renovables, mejoras en el manejo de los recursos hídricos, adaptación de cultivos al cambio climático y mejoramiento de la salud pública, entre otras.

Figura 4. Porcentajes de las emisiones mundiales de GEI en megatoneladas de CO₂.

Tomado de Bárcena, et ál. (2018, p. 22).

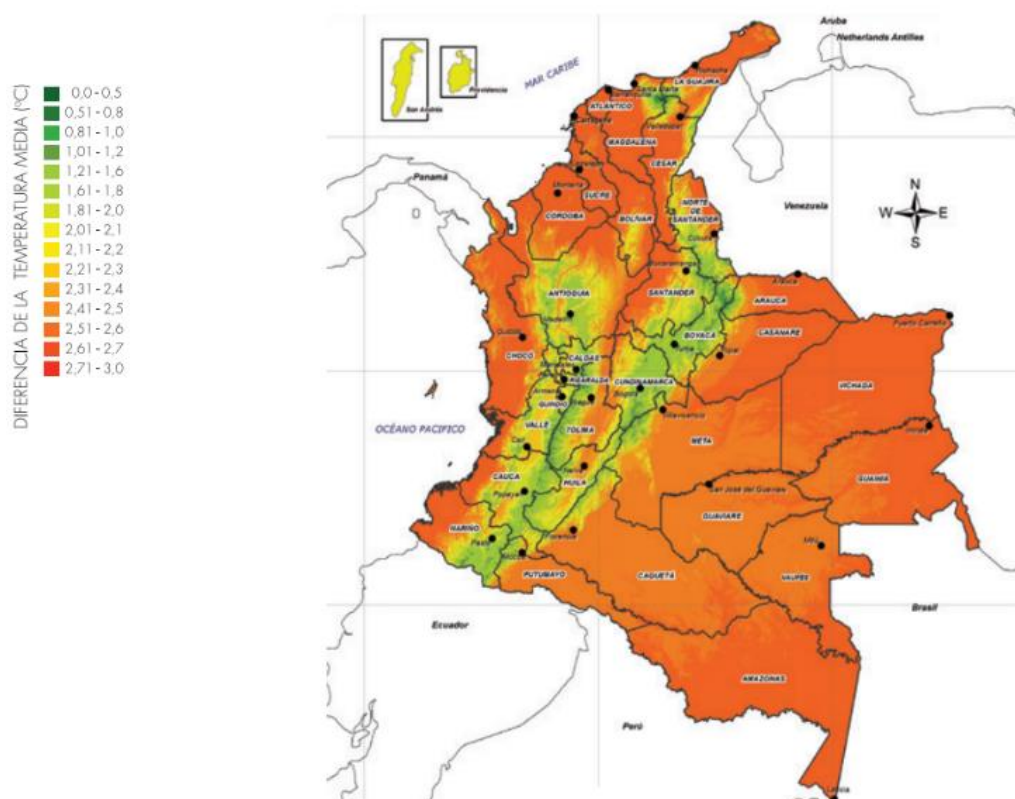
Adicionalmente, en las ciudades el calentamiento de la superficie terrestre en suelos endurecidos en los que se han reducido las coberturas naturales permeables genera islas térmicas, con graves implicaciones en la salud pública, la calidad del aire y la planeación urbana. Ese fenómeno se conoce como Islas de Calor Urbana o ICU, identificadas por primera vez por el climatólogo y geógrafo Gordon Manley en 1958 (Endfield, et ál., 2015). Una vez identificado ese fenómeno, surge la necesidad de caracterizar los espacios urbanos con el propósito de replantear diseños, materiales y distribución de zonas verdes, para la disminución de la radiación en procura del mejoramiento de la calidad de vida.

Colombia no es la excepción a esta problemática ambiental, y aporta el 0.37% del total de gases emitido en el mundo (IDEAM, 2010). Lo anterior ha llevado a implementar estrategias de adaptación, como el uso de fuentes renovables para el sector energético, gas natural en el transporte público masivo y reforestación. A pesar de los esfuerzos, las proyecciones de temperatura anual

media entregados por el IDEAM (2010) revelan picos máximos de temperatura de 3°C entre 2071-2100 respecto de la media entre 1976-2005, como se muestra en la Figura 5.

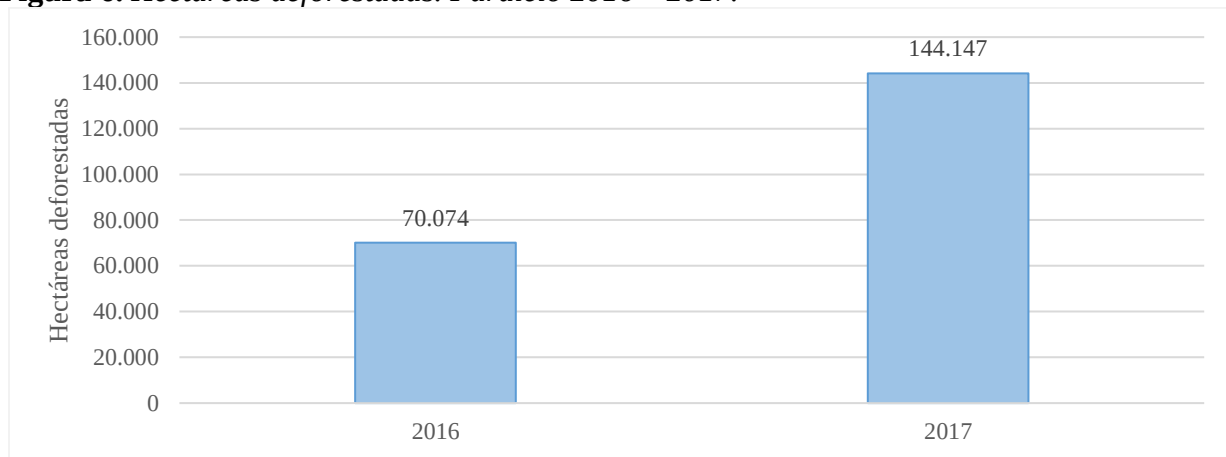
Como se observa, la variación será diferencial en las diferentes zonas del país, aunque la gran mayoría del territorio tendrá incrementos superiores a 2.5°C. Esa realidad en Colombia es alarmante, y se refleja en la situación de deshielo de los nevados que ha alcanzado el 63% en los últimos 50 años, según las cifras del IDEAM publicadas por Ávila (2017).

Figura 5. Diferencia de temperaturas medias anuales, 1976-2005 vs 2071-2100.



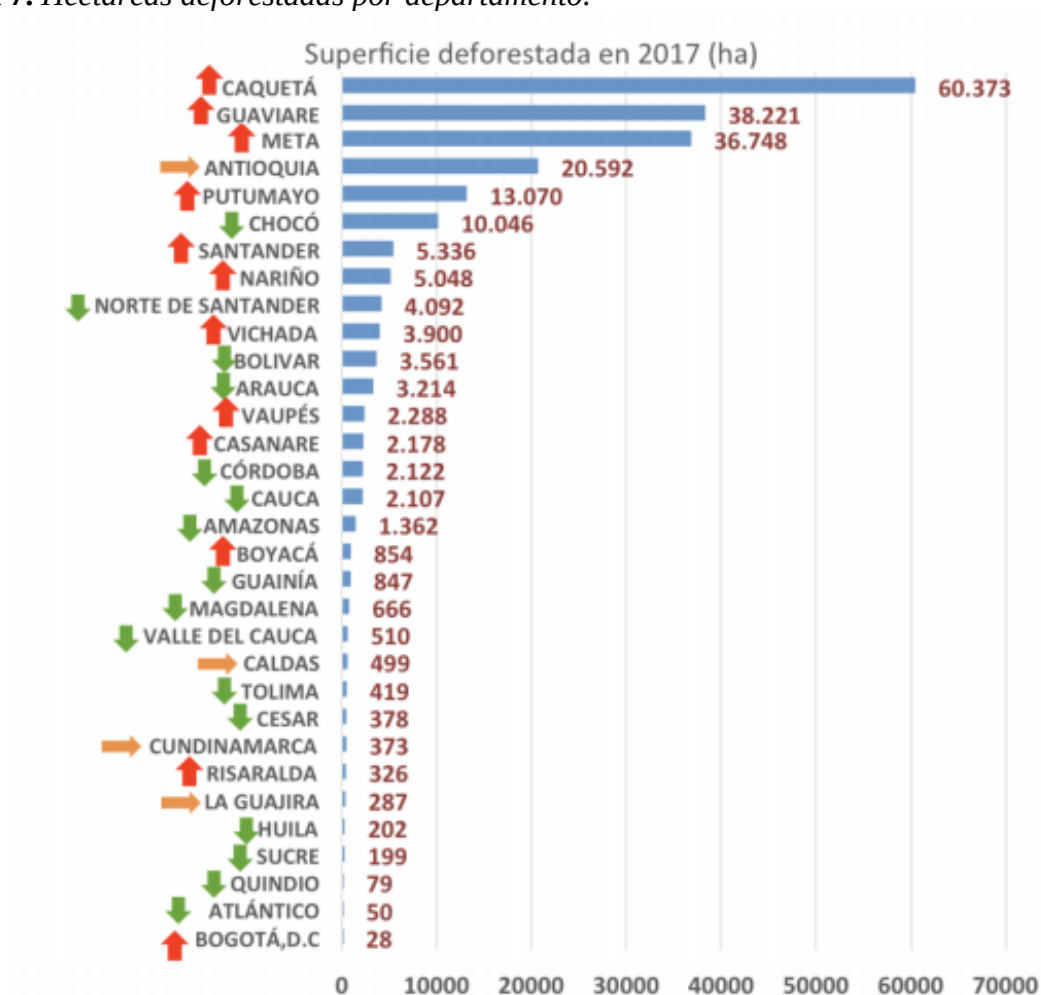
Tomado de IDEAM, PNUD, MADS, DNP y Cancillería (2015, p. 18).

Además de lo anterior, las cifras oficiales (IDEAM, PNUD, MADS, DNP y Cancillería, 2015) revelan que la deforestación aumentó de 70.074 en 2016 a 144.147 hectáreas en 2017 (ver Figura 6).

Figura 6. *Hectáreas deforestadas. Paralelo 2016 – 2017.*

Elaboración propia a partir de cifras obtenidas de IDEAM, PNUD, MADS, DNP y Cancillería (2015).

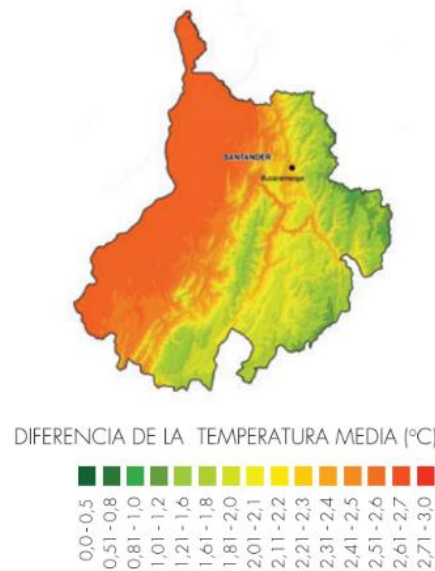
La máxima concentración de la deforestación se produjo en territorio amazónico y fue causado por la agricultura, la ganadería y los cultivos ilícitos. Como lo muestra la Figura 7, Santander también presenta incremento en superficie de tierra deforestada (IDEAM, 2017).

Figura 7. Hectáreas deforestadas por departamento.

Tomado de IDEAM (2017, p. 15)¹

Todo lo anterior evidencia un escenario de incremento de temperatura en Santander, de acuerdo con las proyecciones que se muestran en la Figura 8.

¹ De acuerdo con el IDEAM (2011), en sólo seis departamentos del país se concentra el 81% del total del área deforestada del país

Figura 8. *Proyección de la diferencia de temperatura 1976-2005/2071-2100 en Santander*

Tomado de IDEAM, PNUD, MADS, DNP y Cancillería (2015, p. 49).

La Figura 8 ilustra que en el departamento de Santander habrá regiones que experimentarán este calentamiento con mayor intensidad que otras.

El efecto de esos fenómenos previamente descritos en la arquitectura se manifiesta en el riesgo de que en los proyectos de construcción se implementen materiales poco idóneos, seleccionados por su bajo costo, facilidad de adquisición y tiempos reducidos de construcción, sin considerar sus implicaciones en la dimensión ambiental de la sostenibilidad. Es así como se encuentran materiales impermeables para cubrir sendas peatonales, calles vehiculares, viviendas, oficinas e industrias; esta práctica acentúa las islas de calor y genera microclimas dentro de una misma ciudad. Neila (2004) afirma que los materiales, las técnicas, los sistemas constructivos y los diseños se relacionan íntimamente con el clima, lo que hace necesario identificar las condiciones climáticas de cada territorio para ajustar los diseños y materiales a sus necesidades específicas.

En síntesis, para combatir las nocivas islas de calor se hace necesario caracterizar los materiales existentes en las zonas urbanas del territorio, tal como se propone la presente investigación; esto permitirá vislumbrar las características formal-funcional que puedan generar absorción térmica y conformar islas de calor urbano. Hecho eso, se debe buscar la sustitución de esos materiales y diseños, preferiblemente mediante el uso de la naturaleza como modelo de referencia, mentor y patrón de medida. Esa emulación de las cualidades de los materiales del ciclo natural conduce al uso consciente de los sistemas naturales para aplicarlos en la disposición, formal-funcional de los materiales, artefactos o sistemas (Fraile Narvaez, 2019).

1.2 Objeto de estudio

De acuerdo con el problema planteado arriba, el objeto del presente estudio tiene origen en la deforestación y el empleo de materiales contaminantes concebidos en el modelo de desarrollo actual que ocasionan la generación de gases de efecto invernadero. Ese modelo de desarrollo ha hecho que la radiación solar genere mayores incrementos de temperatura en las zonas urbanas de las ciudades, lo que se refleja en las denominadas islas de calor urbano, caracterizadas por conformar espacios poco confortables que desmejoran la calidad de vida de los habitantes de la ciudad de Bucaramanga.

Específicamente el trabajo se adelantará en las zonas más afectadas de la ciudad, con la detección a meso-escala de las Islas de calor Urbana mediante imágenes georreferenciadas de Satélite Landsat 8 en correlación a fuentes suministradas por el IDEAM desde estaciones meteorológicas en la ciudad de Bucaramanga. Finalmente se propone a recomendar dentro de las superficies horizontales, específicamente en los senderos peatonales un material que contribuya a

reducir esas islas de calor, con el ánimo de dar respuesta al problema de investigación que se formula a continuación.

Además de lo anterior, el Plan Maestro de Espacio Público de Bucaramanga (PMEP), articulado con el Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad (Alcaldía de Bucaramanga, 2021a) resalta la necesidad de entender el espacio público como un lugar propicio para la reconciliación que motive el reencuentro para la vida en todas sus manifestaciones y esto se logra generando ambientes confortables para posibilitar el tejido social.

1.3 Formulación del Problema

A través de la detección de Islas de Calor en la ciudad de Bucaramanga y el análisis de su materialidad, ¿cuál material se puede emplear para reducir la temperatura media en los senderos peatonales con mayor afectación de ICU en Bucaramanga?

1.4 Justificación

En Bucaramanga algunos proyectos de construcción se establecen en áreas arborizadas, por lo que generan deforestación y desplazan la fauna de su hábitat natural, además de que deterioran las condiciones del suelo al sustituir el terreno natural por suelos duros que absorben y transmiten calor. Para poder asegurar condiciones de vida sostenibles, se hace necesario sustituir algunos materiales y técnicas que se utilizan actualmente en la industria de la construcción. Este propósito hace necesario que se generen desde la arquitectura soluciones basadas en los criterios propios del desarrollo ecoefectivo (Braungart y McDonough, 2010), alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

El presente trabajo se enfocará específicamente en aquellos materiales utilizados en las superficies horizontales de la zona urbana de Bucaramanga, dado que allí es donde se recibe mayor radiación al día y es el espacio donde los habitantes de la ciudad experimentan de forma inmediata los efectos del calentamiento que se generan en las denominadas islas de calor urbano.

De esta manera, se busca que el desarrollo del trabajo beneficie en general a los habitantes de la ciudad de Bucaramanga. Así mismo, el proceso de investigación puede ser de interés y utilidad para la comunidad académica y de manera particular para las personas sensibles o interesadas en los problemas ambientales y en la aplicación de la bioclimática a la búsqueda de soluciones a este fenómeno.

1.5 Hipótesis

El desarrollo del presente trabajo se sustenta en la siguiente hipótesis; a través de análisis a meso-escala por medio de imágenes satelitales y el cruce de información geo-referenciada es posible determinar islas de calor en la ciudad de Bucaramanga, específicamente para la zona centro, tal como lo establece Oke (1987) en zonas urbanas. Para comprobar esta hipótesis se contrastaron imágenes satelitales Landsat 8 desde el año 2015 al 2020, en paralelo a datos meteorológicos de estaciones oficiales de la ciudad, comparando temperaturas superficiales (LST) de satélite versus estaciones meteorológicas previamente seleccionada en la ciudad de Bucaramanga, para luego analizar la materialidad de dichas islas de calor y así recomendar materiales desde las propiedades térmicas, exclusivamente en la reflexión o emitancia térmica, desde su rango de albedo y la absortancia térmica que se relaciona directamente con la inercia térmica de los materiales horizontales para senderos peatonales.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Seleccionar un material adecuado para reducir el efecto de islas de calor en senderos peatonales de la zona urbana de Bucaramanga, desde literatura; bajo criterios térmicos relacionados con el índice de reflexión solar y el porcentaje de albedo.

1.6.2 Objetivos específicos

- Identificar en el territorio urbano los microclimas que evidencian mayor absorción térmica.
- Analizar las propiedades requeridas para que un material se comporte como reductor de la absorción térmica.
- Identificar materiales disponibles en la región objeto de estudio que reúnan las propiedades asociadas a la reducción de la absorción térmica.

2. Marco referencial

2.1 Marco teórico

2.1.1 Islas de calor

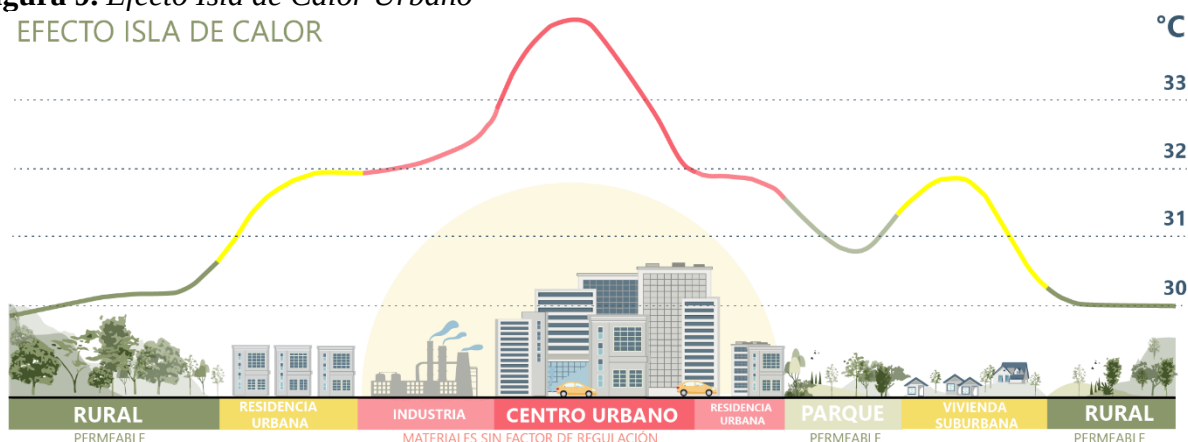
La isla de calor urbano - ICU (en inglés *Urban Heat Island* o UHI) es un fenómeno en el que las áreas urbanas tienen temperaturas más altas que las áreas rurales circundantes (Sánchez

Sánchez, et ál., 2017). Los principales factores que determinan las ICU son el cambio de cobertura del suelo, la expansión urbana y el calor antropogénico, que reducen la eficiencia del enfriamiento evaporativo y aumentan el almacenamiento y liberación de calor en áreas urbanas. Se prevé que la expansión urbana aumente en todo el mundo en el futuro, especialmente en los países en desarrollo, cuya cobertura de suelo urbano se espera que alcance $1,2 \times 10^6 \text{ km}^2$ en 2050 (Novillo Rameix, 2018; Shlomo, et ál., 2011).

El fenómeno ICU se ha atribuido a la modificación en el intercambio de energía entre las superficies urbanas y la atmósfera, que es causado principalmente por una mayor cubierta de superficie impermeable que reemplaza las superficies de vegetación evaporativa, y por liberaciones antropogénicas de calor. Las ICU han contribuido a una serie de cambios ambientales como el clima regional, el crecimiento de la vegetación y la calidad del agua y el aire (Heaviside, et ál., 2017). Estos factores, a su vez, afectan drásticamente la salud y el bienestar humano y pueden conducir potencialmente a un aumento de la morbilidad y la mortalidad, el consumo de energía e incluso incidentes violentos en las zonas urbanas (Yu, Yao, Yang, Wang, & Vejre, 2019). Se espera que el efecto ICU y las consecuencias asociadas sean más severos bajo un clima más cálido y un mundo en rápida urbanización.

Figura 9. Efecto Isla de Calor Urbano

EFECTO ISLA DE CALOR



Adaptado de Oke (1987).

2.1.2 Microclima

Los asentamientos urbanos se forman sustituyendo o modificando entornos naturales por entornos artificiales y estos últimos crean microclimas propios y únicos. En su publicación pionera “El clima de Londres”, Howard (2012) documentó que los microclimas urbanos pueden ser sustancialmente diferentes de sus contrapartes rurales, ya que los primeros tienden a producir y retener más calor y, por lo tanto, se caracterizan por temperaturas más altas.

Interpretar el impacto del efecto ICU (islas de calor urbano) simplemente como un aumento de temperatura dentro de las áreas urbanas sería una simplificación excesiva; el efecto ICU en particular y el microclima urbano en general pueden producir una amplia gama de impactos sobre la salud y el uso de energía y estos impactos no son necesariamente negativos. Por ejemplo, las ICU pueden reducir la demanda de energía de los edificios en función de la ciudad, la ubicación dentro de la ciudad, el tipo de edificio o las condiciones meteorológicas (Liu, Li, et ál., 2020). El conocimiento del microclima urbano y su dependencia de los parámetros físicos claves es importante como entrada para que los diseñadores, arquitectos e ingenieros urbanos diseñen y planifiquen los entornos.

Los enfoques de observación del microclima se refieren a técnicas de medición tales como mediciones de campo, teledetección térmica como las imágenes de satélite o modelado físico a pequeña escala, por ejemplo, pruebas de túnel de viento de la capa límite atmosférica. Tradicionalmente, los enfoques observacionales dominaron el análisis del microclima urbano. Más recientemente, la creciente disponibilidad de recursos computacionales ha conducido a la aplicación de enfoques de simulación numérica. La principal ventaja de los enfoques de simulación numérica en comparación con sus contrapartes observacionales es la oportunidad de realizar análisis comparativos basados en diferentes escenarios (Xu, et ál., 2020).

A nivel mundial, un caso crítico en este aspecto es el de Singapur, que ha pasado de una de las peores situaciones de escasez de viviendas en el mundo en la década de 1960, a un país donde el 90% de sus ciudadanos actualmente poseen vivienda propia, a pesar de que su población se ha triplicado en los últimos 50 años. Sin embargo, ese éxito de las políticas de vivienda ha hecho que la tierra natural haya sido reemplazada por superficies artificiales, con efectos térmicos indeseables (Manoli, et ál., 2019). Este problema, unido a la creciente industrialización, ha provocado un considerable deterioro del entorno urbano.

En países tropicales como Singapur o Colombia, el clima de alta temperatura, alta humedad y alta radiación solar a menudo causa estrés por calor a los residentes, lo que resulta en un impacto negativo en la salud pública y la productividad. El diseño urbano sensible al clima puede crear microclimas que las personas experimentan como más frescos que el clima predominante, y hace que los espacios urbanos sean agradables.

Aunque existen diversas propuestas para reducir el estrés por calor urbano y/o mejorar el confort térmico al aire libre y a diferentes escalas espaciales, su eficacia es un tema de debate. La razón principal es que las profesiones dominantes del diseño y la planificación urbana, a saber, la

arquitectura y la ingeniería, hasta ahora se centran en la influencia del paisajismo en las temperaturas del aire y de la superficie y su efecto posterior en los edificios. Sin embargo, el impacto de las contramedidas del diseño urbano en el confort térmico urbano va más allá de los factores microclimáticos, como la temperatura de la superficie o del aire (Muñoz Salamanca, 2020).

Existen siete factores o parámetros que afectan el confort térmico humano en un ambiente al aire libre; son la temperatura del aire, la humedad del aire, el viento, la radiación solar, la radiación terrestre, el calor metabólico y el aislamiento de la ropa; los primeros cinco parámetros se ven afectados por los entornos urbanos, mientras que los dos últimos están relacionados con cada persona (Liu, Brown, et ál., 2020). A escala de vecindario o comunidad, los elementos del paisaje pueden modificar no solo el viento y la radiación, sino también la temperatura y la humedad del aire.

El estrés por calor urbano se puede reducir mediante un diseño adecuado del paisaje. El enverdecimiento adecuado puede mejorar en gran medida el microclima urbano; la vegetación y los elementos del paisaje afectan el confort térmico exterior de los edificios. Estudios sobre los efectos de la vegetación, la densidad urbana, la altura de los edificios y las condiciones atmosféricas sobre las temperaturas locales y el confort térmico en tres ciudades diferentes de Italia, mostraron que la vegetación tiene mayores efectos de enfriamiento con edificios más altos (Guattari, et ál., 2018). Los árboles mostraron ser más efectivos para mitigar el estrés por calor humano que solo los pastizales; el uso de árboles densos ayuda a reducir el estrés por calor, aunque la vegetación podría afectar negativamente la circulación del viento.

2.1.3 *Absorción térmica*

El impacto del diseño de la cobertura terrestre en la temperatura radiante media urbana es un efecto combinado de los diversos materiales utilizados en un área en particular. Las condiciones climáticas del espacio exterior y su efecto en los trabajadores exteriores se reflejan en una gama de sensación térmica y estrés fisiológico.

La temperatura radiante media es la variable que gobierna el equilibrio energético humano y, por tanto, afecta la sensación térmica exterior y el estrés fisiológico. Las temperaturas radiantes medias de las superficies terrestres se ven afectadas en gran medida por las propiedades termodinámicas del tipo de material utilizado en la superficie, que incorpora humedad superficial, absorción y emisión térmica, radiación reflejada y atmosférica. Las propiedades térmicas de cada material de cobertura hacen que éste responda de manera diferente a la radiación solar incidente (Ordóñez Martín y Gómez de Cózar, 2020).

La intensidad del flujo de calor se ve determinada por el diferencial de temperatura de un tipo de superficie terrestre particular y el aire por encima de él, lo que se traduce en el calor ambiental observado o la temperatura ambiente.

La temperatura fisiológica equivalente (en inglés PET – *Physiological Equivalent Temperature*) cuida la piel del cuerpo humano en condiciones exteriores extremas; la PET representa un índice que sirve para la evaluación térmica de un ambiente dado y explica los procesos de regulación del calor corporal, como las constricciones y la dilatación de los vasos sanguíneos periféricos (Thorsson, et ál., 2021). La tensión térmica experimentada por un individuo está relacionada con el estrés de calor al que está expuesto; cuando aumenta esa tensión, el organismo busca recuperar la temperatura para mantenerla dentro de un rango relativamente estrecho.

La variación en la temperatura exterior debe estar dentro del rango de la PET neutra para que la persona perciba sensación de confort. La pérdida de calor del cuerpo humano por convección y a través de la respiración seca, disminuyen en la medida en que aumenta la temperatura ambiente (Fernández Cheliz, 2021).

A pesar de los niveles de tolerancia al calor de cada persona, que dependen de la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y el tipo de trabajo, el objetivo del control del estrés por calor en un rango de temperatura es garantizar que la temperatura corporal profunda no supere los 38 °C. La exposición frecuente a calor intenso o altas temperaturas durante períodos prolongados puede inducir un mayor estrés por calor ocupacional que potencialmente conduce a fatiga, intolerancia química, insolación y agotamiento (Fernández Alfaro, 2018).

El microclima en el contexto urbano tiene impacto significativo en el bienestar humano en las ciudades, así como en la demanda energética para acondicionamiento de edificios. Los materiales de superficie con alta absorción térmica, alta capacidad térmica y baja permeabilidad, darán como resultado temperaturas más altas en verano, mientras que el verde urbano, el agua y la sombra reducirán las temperaturas de manera efectiva; el intercambio de aire alivia el estrés térmico y las cargas de humedad.

Dado que la demanda de energía generalmente se evalúa con periodicidad anual, las investigaciones del microclima urbano y su impacto en la demanda de refrigeración también deben realizarse mediante estudios de simulación a largo plazo.

Este recorrido de la categoría ambiental conduce a la identificación de los conceptos que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. *Conceptos identificados en la categoría ambiental*

Concepto	Definición
Isla de calor Urbano (ICU)	Fenómeno en el cual se produce incremento de las temperaturas en el centro de las ciudades en comparación con las periferias menos urbanizadas (Salami Magar, et ál., 2021)
Isla de Calor de la Capa Dosel - Palio Urbano (ICCP)	Es el calentamiento de la atmósfera urbana bajo los tejados de las edificaciones (Cuesta Navarro, 2020)
Radiación	Es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas que se manifiesta en cualquier cuerpo por el solo hecho de encontrarse a una determinada temperatura (Asheichyk y Krüger, 2018)
Conducción	Es el método de transmisión de energía térmica en los cuerpos sólidos puestos en contacto (Xu, et ál, 2019)
Convección	Es el método de transmisión de calor que tiene lugar en el fluido provocado por los movimientos de la masa del mismo (Xu, et ál., 2019)

2.1.4 Influencia de las políticas internacionales en el plan de desarrollo nacional

Los asuntos relacionados con el medio ambiente tienen la característica de que superan las fronteras artificiales que ha creado el hombre para distinguir zonas geográficas (Kimmig, et ál., 2020); en otras palabras, las líneas divisorias imaginarias que delimitan municipios, departamentos y países realmente no existen en el terreno físico, por lo que los efectos de lo que hace una empresa en China terminan afectando el clima de los demás países, incluido Colombia, al igual que la contaminación que se presenta en la sabana de Bogotá se refleja en la calidad del agua que se consume en Girardot o en Barranquilla.

Por esa razón, la comunidad internacional establece acuerdos que son puestos a consideración por los organismos internacionales y posteriormente son ratificados por los gobiernos de cada país. Al igual que sucede con otros temas como la lucha contra el crimen organizado, en materia ambiental se han celebrado acuerdos como el de París, por medio de los cuales se establecen compromisos globales cuyo cumplimiento depende de que los países a nivel individual tomen las medidas necesarias sobre los aspectos que están bajo su jurisdicción.

Es así como, al explicar la forma como el país actuará frente al Acuerdo de Paris, de acuerdo con García Arbeláez (2016):

A finales de 2015, Colombia se comprometió ante la comunidad internacional a tomar 10 medidas concretas de adaptación, que van desde la delimitación y protección de los 36 complejos de páramos, hasta lograr que el 100 % del territorio nacional cuente con planes de adaptación al cambio climático. Esta contribución va de la mano del Plan Nacional de Adaptación y la Política Nacional de Cambio Climático, actualmente en proceso de adopción (p. 4).

Este es tan solo un ejemplo de la forma como las políticas internacionales tienen influencia en el plan de desarrollo nacional.

2.1.5 Comercialización de materiales en el país.

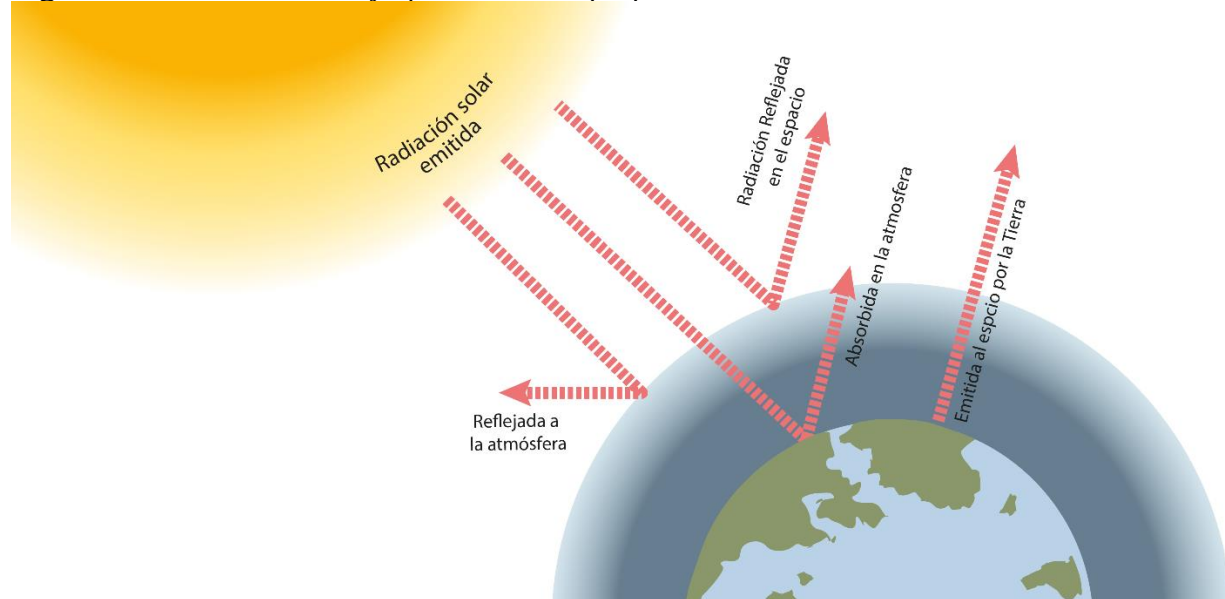
Si bien en materias como la protección ambiental o la lucha contra el crimen transnacional los países, incluido Colombia, suscriben acuerdos que obligan a las partes a tomar determinadas medidas internas, ese tipo de acuerdos avanza a un ritmo más lento cuando se trata de enfrentar otro tipo de problemas menos visibles. En lo que tiene que ver con la sostenibilidad de la construcción, en Estados Unidos existe el Centro de Sostenibilidad del Hormigón (en inglés, MIT *Concrete Sustainability Hub - CSHub*); que es un equipo interdisciplinario con investigadores de varios departamentos del Instituto Tecnológico de Massachussets que trabajan en ciencia, ingeniería y economía del hormigón y la infraestructura desde 2009. Esta institución reúne a líderes de la academia, la industria y el gobierno para desarrollar avances utilizando un enfoque holístico que logrará viviendas, edificios e infraestructura duraderos y sostenibles en entornos cada vez más exigentes (Concrete Sustainability Hub, 2021).

Esta institución ya cuenta en la actualidad investigaciones que le han permitido hacer recomendaciones específicas relacionadas con el empleo de materiales que contribuyen a la prevención y mitigación de las islas de calor, por ejemplo, consultar a Sobstyl, et ál. (2018). Entre tanto, Colombia aún no cuenta organizaciones de ese tipo, por lo que en el país aún se presentan mayor libertad para que se utilicen y comercialicen materiales que son empleados en la industria de la construcción que no solamente no son objeto de este tipo de estudios, sino que, de acuerdo con Calderón Rojas (2020), en algunos casos pueden ingresar al país después de haber sido rechazados por las normas internas de otros países.

2.2 Marco conceptual

La radiación solar que incide en la superficie terrestre se comporta tal como se ilustra en la Figura 10.

Figura 10. Radiación solar y efectos en la superficie terrestre



Adaptada a partir de Gutiérrez Hernández (2018).

A nivel macro, una parte de la radiación solar es reflejada por la atmósfera y por la superficie terrestre, por lo que se devuelve y queda la radiación solar neta; parte de esa radiación neta es absorbida por la superficie de la tierra y esa absorción varía localmente de acuerdo con las características del suelo. Otra parte es nuevamente reflejada por los gases de efecto invernadero y devuelta nuevamente a la tierra, con lo cual se incrementa aún más la temperatura terrestre. La parte restante que no es reflejada por estos gases, finalmente se devuelve al espacio.

Para los efectos del presente trabajo interesa la parte de la energía que es absorbida por la tierra, la que varía de acuerdo con las propiedades de absorción térmica del material del piso.

La absorción térmica es una propiedad de la superficie que permite evaluar el carácter de un material con respecto a su sensación de frío o calor, es decir, la sensación que se obtiene cuando la piel humana toca brevemente cualquier objeto, como sucede por ejemplo con un material textil.

La conductividad térmica es directamente proporcional, a la densidad, y al calor específico de cada material; es decir para que un material tenga mayor absorción térmica debe tener mayores niveles de conductividad, densidad y calor específico.

2.3 Marco legal y normativo

El Consejo Mundial para la Construcción Verde fue fundado 1999 con el propósito de coordinar la acción de los organismos que en cada país se encargan de apoyar la transformación de la industria de la construcción hacia un escenario de sostenibilidad. De acuerdo con Simón Grau y López Ayerra (2018), el sistema de Certificación LEED v4- ND auspiciado por el Consejo de Construcción Verde de Estados Unidos, en el capítulo *Gib Credit: Heat Island Reduction*, incluye recomendaciones de medidas a adoptar en las superficies horizontales de pavimentos para mitigar los efectos sobre los microclimas, hábitats humanos y la vida silvestre, de manera que se reduzca

la creación de islas de calor. Esa institución considera que un determinado material es reflectante si el índice de reflexión solar (SR) después de tres años de su instalación en obra es de 0,28 o más; en el caso de materiales nuevos, recién instalados, se consideran los materiales con SR de 0,33 o superiores.

Por otro lado, los criterios de evaluación para alcanzar la certificación LEED incluyen ocho dimensiones. Dependiendo del puntaje obtenido, los niveles de esa certificación pueden ser *Certified* (40 a 49 puntos), *Silver* (50 a 59 puntos), *Gold* (60 a 79 puntos) y *Platinum* (80 puntos o más). Las ocho dimensiones son localización y transporte, espacio sostenible, eficiencia del uso del agua, energía y atmósfera, materiales y recursos, calidad ambiental interna, innovación y procesos y créditos de prioridad regional. La dimensión de espacio sostenible considera estrategias orientadas a las prácticas que se utilizan durante la implantación de la edificación en relación con su la reducción del impacto en el ecosistema y se enfoca en los problemas que con mayor frecuencia se presentan en los grandes centros urbanos, como la reducción del uso del automóvil y las islas de calor (Suzer, 2019). De acuerdo con Alis Restrepo (2018), dentro de las obras que en Colombia cuentan con certificación LEED®, en Bucaramanga se encuentran las instalaciones de Homecenter.

A nivel regional se debe registrar que, de acuerdo con las Propuestas de Proyecto de Desarrollo Tecnológico y Transferencia de Conocimiento y/o Tecnología para la Innovación dadas a conocer por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias, 2018), el Departamento de Santander debe avanzar en el “desarrollo tecnológico, innovación y transferencia de tecnología con el propósito de aumentar la competitividad y productividad de los sectores priorizados por el departamento que ayuden a generar bienes y servicios competitivos”

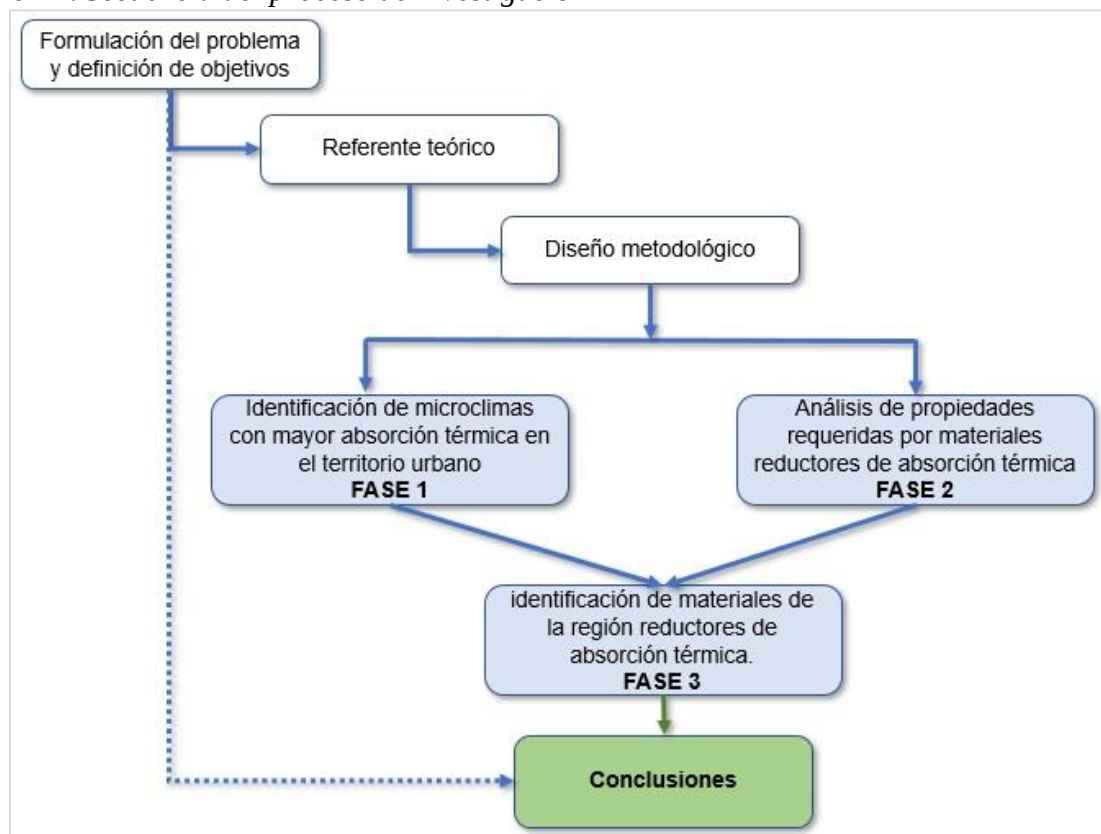
(Colciencias, 2018, p. 15). El presente proyecto puede representar una contribución a ese objetivo del departamento.

3. Método

La metodología de trabajo es de enfoque mixto; ya que inicialmente se caracterizó el espacio a partir de la cuantificación, de datos precisos de radiación y temperatura para ubicar la zona de calor, posteriormente tuvo lugar la cualificación bajo un enfoque descriptivo, dónde para desarrollar los objetivos específicos 2 y 3; se basó en fuentes secundarias.

De acuerdo con las fases descritas, el proceso de investigación seguirá la secuencia que se muestra en la Figura 11.

Figura 11. *Secuencia del proceso de investigación*



3.1 Fase uno: identificación de microclimas que evidencian mayor absorción térmica en el territorio urbano

Con el desarrollo de esta fase se alcanzó el objetivo específico 1.

1. Se realizó la ubicación del territorio objeto de estudio y se caracterizó el espacio con su respectiva ubicación georreferenciada. Se realizó la clasificación del clima según CALDAS-LANG y metadatos del IDEAM entre el 2015 y 2020 para Bucaramanga.
2. Se detectaron las diferentes zonas y comunas de la ciudad desde imágenes Landsat 8, con bandas 3,4,5 y 11 desde QGIS que lograron identificar la radiación y temperaturas.

3.2 Fase dos: análisis de las propiedades requeridas para que un material se comporte como reductor de absorción térmica

Para cumplir con este objetivo se procedió al estudio de los fenómenos físicos que se presentan cuando la radiación solar incide en un material; a continuación, se revisó la literatura especializada en la que se explican las características o propiedades que hacen que un material presente ese comportamiento. Este tipo de conocimiento se obtuvo de publicaciones científicas y técnicas realizadas por fuentes reconocidas y debidamente soportadas por estudios empíricos, tales como libros, revistas especializadas, investigaciones académicas y reportes de estudios institucionales o industriales, nacionales e internacionales, que hayan hecho referencia a estos fenómenos.

Se realizó un método de revisión sistemática de literatura (Xiao y Watson, 2019), técnica reconocida como una característica esencial de la investigación académica. Fundamentalmente, el avance del conocimiento debe basarse en el trabajo previo existente; para empujar la frontera del conocimiento se requiere saber dónde está la frontera. Se utiliza este método teniendo en cuenta

que, al revisar la literatura relevante, se comprende la amplitud y profundidad del trabajo existente y se identifican las lagunas para explorar. Mediante el resumen, análisis y síntesis de un grupo de literatura relacionada, se puede probar una hipótesis específica y/o desarrollar nuevas teorías, así como evaluar la validez y calidad del trabajo existente (Kraus, et ál., 2020).

3.2.1 Estrategia de búsqueda

Dado que se busca garantizar la rigurosidad científica del trabajo, se consultaron solamente artículos publicados en bases de datos reconocidas como son Proquest, Cedex, Redalyc, Ebsco, Elsevier, Google Académico, y Web of Science entre enero de 2016 y diciembre de 2021, en idiomas inglés y español. Asimismo, se incluyeron en la búsqueda bases de datos de universidades y revistas especializadas. Se tomaron en cuenta estudios en inglés y en español considerando que la mayoría de la literatura científica disponible se encuentra publicada en estos dos idiomas.

3.2.2 Palabras claves para la búsqueda

Las palabras claves que se emplearon para la búsqueda de publicaciones son las que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Palabras claves para la búsqueda

Idioma español	Idioma inglés
Absorción térmica	<i>Thermal absorption</i>
Cubierta vial	<i>Road cover</i>
Islas urbanas de calor	<i>Urban heat islands</i>
Materiales	<i>Materials</i>
Confort térmico	<i>Thermal comfort.</i>
Materiales de la superficie terrestre	<i>Land surface materials</i>
Temperatura fisiológica equivalente	<i>Physiologic Equivalent Temperature</i>

3.2.3 Criterios de inclusión

Se consideraron elegibles las publicaciones que se realizaron basadas en investigaciones apoyadas en fuentes primarias, sobre la evaluación y el desempeño de materiales con favorables características de absorción térmica para la construcción de cubiertas. Los trabajos describieron la metodología empleada, el sustento teórico con base en el cual se definió la metodología, el sitio en donde se realizó cada trabajo, los resultados obtenidos y las conclusiones y recomendaciones generadas. Se analizaron estudios de caso, trabajos tanto de corte cualitativo como cuantitativo, de origen académico, oficial o gremial. Con el propósito de emplear información actualizada se tomó el período de enero de 2016 a septiembre de 2021.

3.2.4 Criterios de exclusión

Se excluyeron trabajos que se refieren exclusivamente a consideraciones teóricas sobre materiales de absorción térmica, así como publicaciones orientadas a la promoción comercial de productos o en idiomas diferentes a español e inglés. Adicionalmente, se excluye la profundización en materiales inteligentes como los nanotecnológicos, termocrómicos, fotocrómicos, biopolímeros y los materiales con cambio de fase (PCM) para el caso de los pavimentos asfálticos, ya que la disponibilidad para adquirirlos en la región acarrea altos costes de importación y desplazamientos, incrementando la huella de carbono con impactos ambientales negativos debido al incremento de los gases de efecto invernadero.

3.2.5 Evaluación de calidad de los artículos preseleccionados

Todos los estudios que superaron los criterios de inclusión y de exclusión se sometieron a una evaluación de calidad basada en cuatro criterios, como se presenta en la Tabla 4. A cada

estudio se le asignó un puntaje de 1 o 0, según el cumplimiento o no de los criterios que se describen en esta tabla.

Tabla 4. Evaluación de calidad

Criterio	Descripción	Puntaje	Cuando:
Rigurosidad	El estudio ha sido publicado por bases de datos seleccionadas	N. A.	Requisito de inclusión
Pertinencia	El estudio se relaciona con materiales probados en la mejora de desempeño de cubiertas ubicadas en islas urbanas de calor	N. A.	Requisito de inclusión
Metodología	El estudio describe la metodología empleada, el sustento teórico, la población incluida, los resultados y las conclusiones y recomendaciones	N. A.	Requisito de inclusión
Bases del estudio	El estudio se basa en información obtenida a partir de fuentes primarias	1	El estudio se basa en información obtenida en fuentes primarias
		0	El estudio se basa en información obtenida en fuentes secundarias
Aplicación del estudio	Los resultados del estudio ya fueron aplicados y probados	1	Si fueron aplicados y probados
		0	No han sido aplicados y probados
Sustento teórico	El estudio contiene el sustento teórico correspondiente	1	Sí contiene el sustento teórico
		0	No contiene el sustento teórico
Aplicabilidad del estudio	El estudio ha sido probado en varios escenarios diferentes	1	Los resultados del estudio han sido probados en más de un escenario
		0	Los resultados del estudio han sido probados en un solo escenario

Una vez calificadas las diferentes publicaciones y asignadas las puntuaciones, se seleccionaron aquellas que obtuvieron el mayor puntaje. De esas publicaciones se extrajo la información relevante para el cumplimiento del tercer objetivo del trabajo.

3.3 Fase tres: identificación de materiales existentes en la región que reúnen las propiedades asociadas a la reducción de absorción térmica.

Para desarrollar este objetivo final del trabajo se tuvieron en cuenta los resultados de las fases 1 y 2. Primero se realizó el análisis de materiales existentes en el territorio objeto de estudio con mayor afectación de ICU y esta información se correlacionó con la revisión de materiales sugeridos en literatura de la fase 2 de fácil adquisición en la región.

4. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las diferentes fases del proceso de investigación.

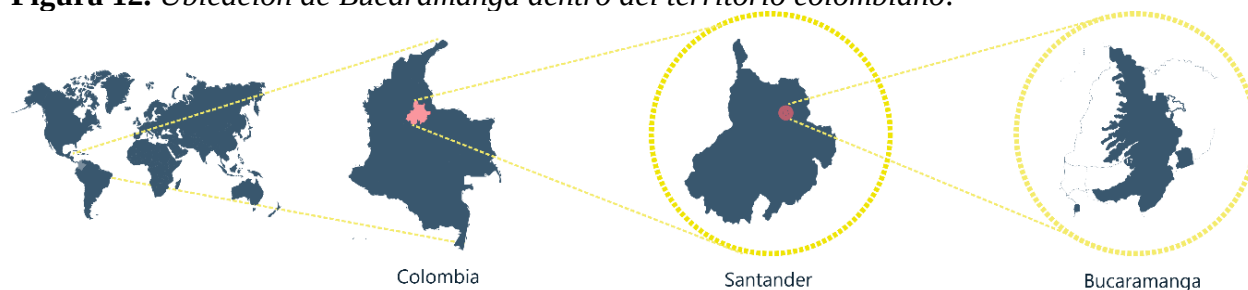
4.1 Fase uno: identificación de microclimas que evidencian mayor absorción térmica en el territorio urbano

Para la detección de los microclimas e islas de calor en el territorio de Bucaramanga fue necesario caracterizar el espacio, conocer latitud, altitud, temperatura, radiación, humedad relativa y dirección del viento; requeridos para la teledetección por medio de imágenes satelitales Landsat 8, georreferenciadas con los criterios climáticos para los años y tiempos de la toma de la imagen desde el 2015 al 2020.

4.1.1 Caracterización de la zona objeto de estudio

Bucaramanga es una ciudad ubicada en el departamento de Santander (Colombia); con latitud: 7°5'59.99" N, Longitud 73°6'36" W y Altitud de 970 msnm según datos tomados de la estación meteorológica de Neomundo entre 2015 y 2020. Cuenta con una precipitación anual de 1270 mm según registros del IDEAM (2016).

La ubicación de la ciudad dentro del territorio nacional y del departamento se presenta en la Figura 12.

Figura 12. *Ubicación de Bucaramanga dentro del territorio colombiano.*

Para el desarrollo del presente estudio se abordaron datos del IDEAM, solicitados por medio de *Metada* para los periodos de 2015 a 2020. Estos datos fueron tabulados y analizados para 6 años, 2015 al 2020; sin embargo, para la correlación de cobertura vegetal y algunos puntos de mayor temperatura se analizaron imágenes procedentes de satélite Landsat 8 para el 2013, 2014 y 2021.

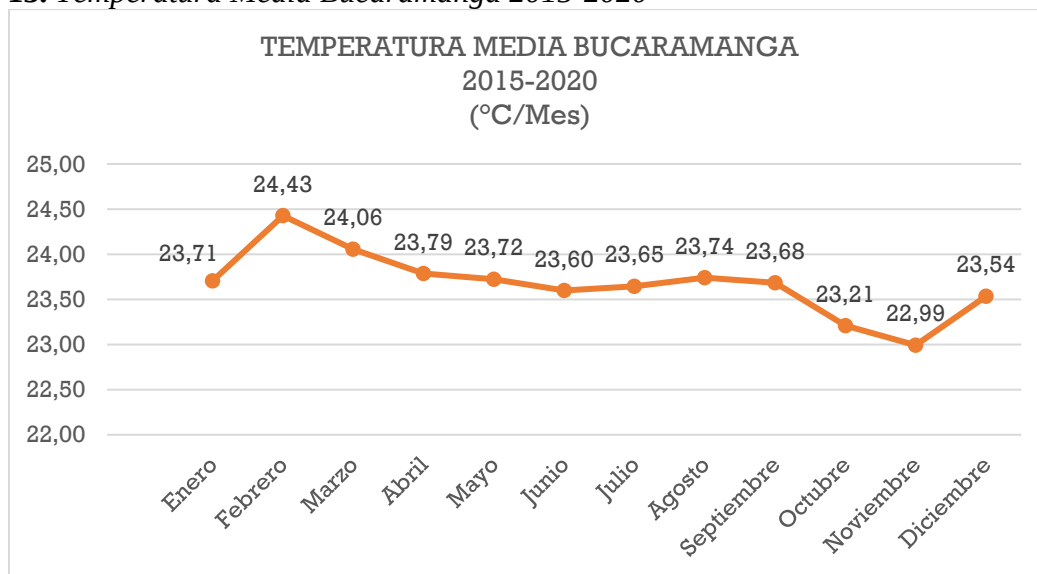
Se hace hincapié en la información solicitada al IDEAM, tabulada y analizada en los Anexos 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0; que fue soporte para la caracterización del espacio 2015-2020 del presente estudio.

Es importante resaltar que los datos tabulados pertenecen no sólo a temperaturas medias y temperaturas máximas y mínimas; sino, a humedad relativa, radiación y vientos que se requirieron para el desarrollo de la segunda actividad, del primer objetivo (Detección de zonas y comunas desde imágenes satelitales Landsat 8).

Se establece entonces según tabulación y análisis, los siguientes datos de temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, radiación y vientos para los periodos comprendidos entre 2015 y 2020.

4.1.1.1 Temperatura 2015-2020. El promedio de *temperatura media* en Bucaramanga de 2015 a 2020 demuestra que el mes con mayor temperatura media es *febrero*, donde se evidencia un pico que desciende hacia junio y se vuelve a incrementar en julio hasta tener otro pico en agosto.

Figura 13. *Temperatura Media Bucaramanga 2015-2020*



Elaboración propia (tabulación, compilación y análisis) a partir de metadatos obtenidos del IDEAM (2022).

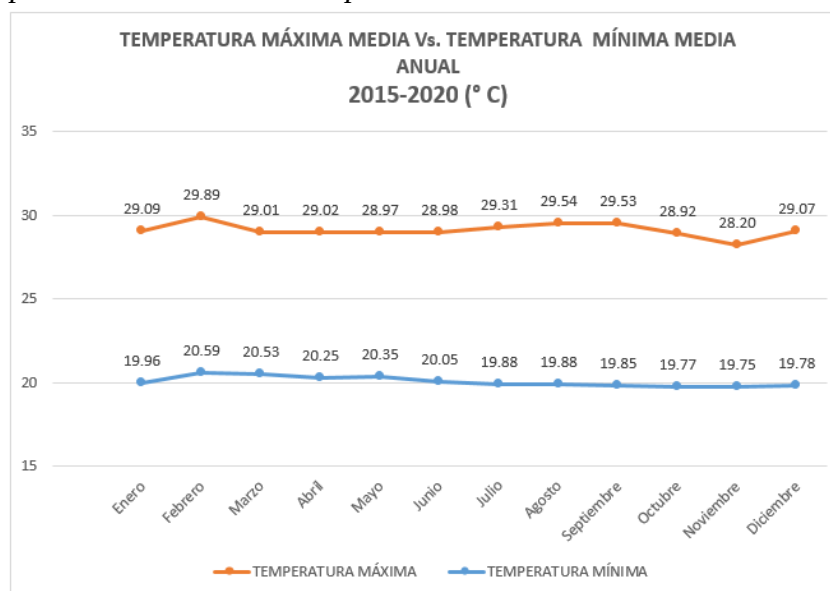
La temperatura mínima y máxima a partir de la *metadata* es procesada y tabulada para verificar los días con mayor temperatura en la ciudad y los días con menor temperatura.

Dentro de la información tabulada, se encuentra que la temperatura máxima en la ciudad de Bucaramanga se genera entre las 10:05 de la mañana hasta las 3:00 de la tarde; sin embargo, las horas de mayor temperatura se dan entre las 12:00 del mediodía y la 1:00 de la tarde, debido a la incidencia perpendicular de los rayos del sol sobre la superficie terrestre en esta zona cercana a la línea ecuatorial.

Dentro de la media de temperatura máxima y de temperatura mínima del 2015 al 2020 se logra evidenciar el mes de febrero como el más caliente, por una curva que decae y se incrementa

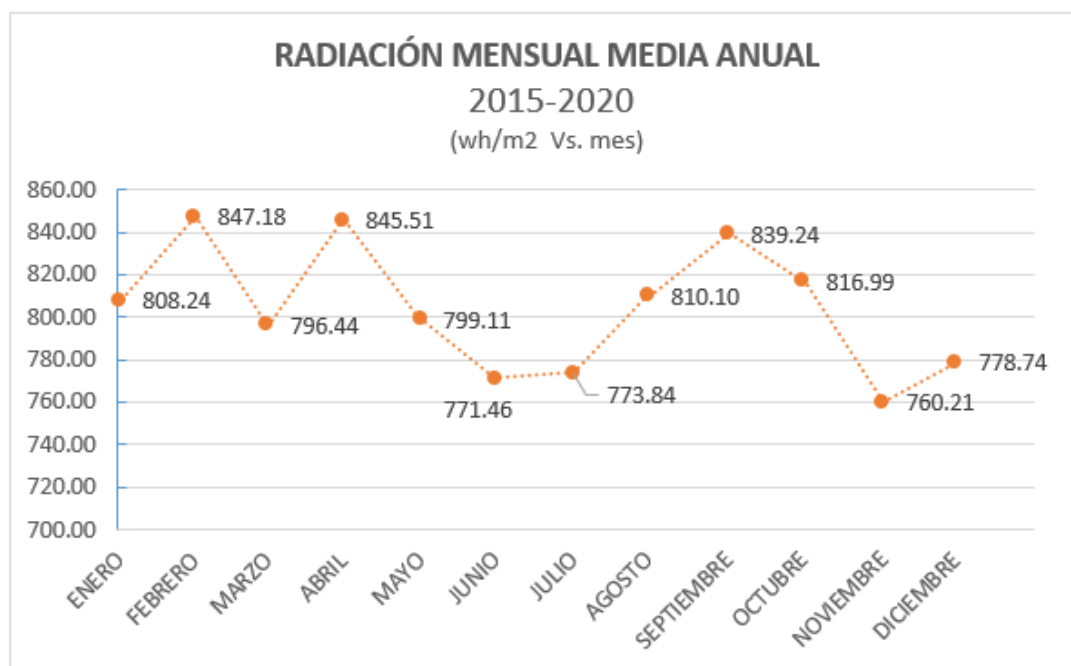
de nuevo en septiembre y decae por completo en noviembre. Para septiembre coincide con el equinoccio que se da entre el 20 y 23 de septiembre, sin embargo, febrero antecede al equinoccio de marzo que se da entre el 20 y 23 de ese mes.

Figura 14. *Temperatura Máxima Vs. Temperatura Mínima media Anual 2015-2020*



Elaboración propia (tabulación, compilación y análisis) a partir de metadatos obtenidos del IDEAM (2022).

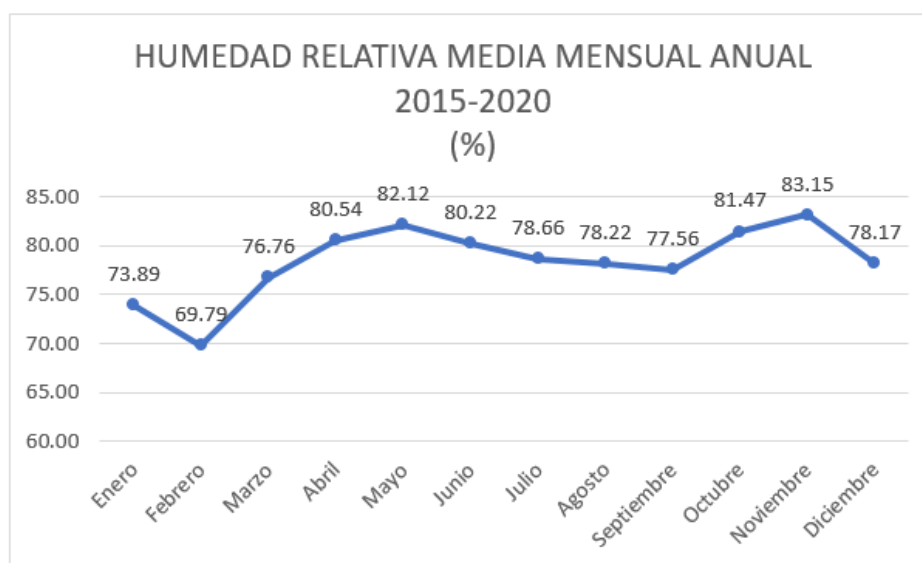
4.1.1.2 Radiación 2015-2020. La máxima radiación en Bucaramanga mensual anual se presentó en el mes de febrero del año 2017, guardando coherencia con el mes de mayor radiación en la media anual, así mismo, el mes con máxima temperatura media para el periodo comprendido entre el 2015 y 2020.

Figura 15. Radiación Mensual Media Anual 2015-2020

Elaboración propia (tabulación, compilación y análisis) a partir de metadatos obtenidos del IDEAM (2022).

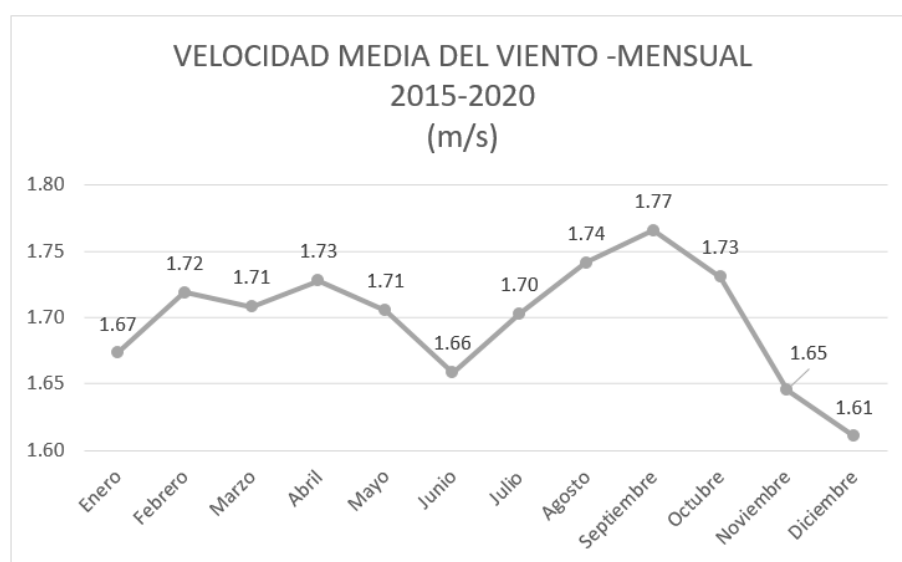
Los puntos de mayor radiación en Bucaramanga se dan en los meses de febrero, abril y septiembre.

4.1.1.3 Humedad relativa. Como resultado obtenido de la humedad relativa, febrero y noviembre se consideran en el periodo de 2015 al 2020, los meses con menor y mayor porcentaje de humedad relativa respectivamente. Finalmente, la humedad relativa media anual para Bucaramanga registrada entre el año 2015 al 2020 es de 79.5%.

Figura 16. *Humedad Relativa Media Mensual Anual 2015-2020*

Elaboración propia (tabulación, compilación y análisis) a partir de metadatos obtenidos del IDEAM (2022).

4.1.1.4 Vientos. La velocidad de los vientos en Bucaramanga entre el año 2015 y 2020, según metadatos obtenidos del IDEAM, tiene una media de 1.7 m/s.

Figura 17. *Velocidad Media del Viento Mensual 2015-2020*

Elaboración propia (tabulación, compilación y análisis) a partir de metadatos obtenidos del IDEAM (2022).

La dirección de los vientos en Bucaramanga predomina en un 43% en sentido norte, según datos del IDEAM; sin embargo, es perceptible la variación que existe desde el norte hasta el sur por la zona oriente; esto debido a los vientos alisios que ingresan desde Venezuela por la cordillera oriental y se encaminan en sentido nororiente.

4.1.1.5 Clasificación Caldas Lang. Tal como lo señala el IDEAM (2011), la clasificación de Caldas Lang utiliza como variables de entrada la precipitación media anual, expresada en milímetros, y la temperatura media anual en °C.

Es indispensable hacer la correlación de datos climatológicos entre 2015 y 2020 obtenidos desde el estudio actual y los datos entre 1981 y 2010, a fin de revisar posibles variaciones en el tiempo.

Tabla 5. *Promedios Climatológicos de Bucaramanga entre 1981-2010 y 2015-2020*

Aspectos Climatológicos	1981-2010	2015-2020
Temperatura media anual (°C)	23.1	23.7
Temperatura máxima anual (°C)	28.7	29.1
Temperatura mínima anual (°C)	19	20.1
Humedad relativa (%)	83%	79.5%

Elaboración propia (tabulación, compilación y análisis) a partir de metadatos obtenidos del IDEAM (2022).

Se percibe un cambio en la temperatura media anual de Bucaramanga de 0.6 °C; para la temperatura máxima y mínima una variación de 0.4 °C y 1.1°C respectivamente. La humedad relativa decrece en el tiempo, con una variación de 3.5%.

Con los datos anteriormente descritos se realizó la clasificación Caldas Lang; donde la clasificación Lang tiene en cuenta el factor que corresponde al valor de la precipitación anual (P) dividido por la temperatura media (T) así: índice de humedad Lang = P/T .

De acuerdo con los datos suministrados por el IDEAM Bucaramanga tiene una clasificación Caldas Lang *templado semiárido*.

Tabla 6. *Clasificación Caldas Lang*

Piso Térmico	Rango de elevación (m)	Rango de temperaturas (°C)
Cálido	0 a 800	≥ 24
Templado	800 a 1800	$18 < T < 24$
Frío	1800 a 2800	$12 < T < 18$
Muy frío	2800 a 3700	$6 < T < 12$
Extremadamente frío	3700 a 4700	$0 < T < 6$
Nival	> 4700	< 0

Nota: la fila sombreada indica el rango de elevación y temperatura para Bucaramanga. Adaptado a partir de clasificación Caldas (IDEAM, 2005).

Tabla 7. *Clasificación Lang*

Factor de Humedad	Factor de Lang (P/T)
Desértico	0 a 20
Árido	20.1 a 40.0
Semiárido	40.1 a 60.0
Semihúmedo	60.1 a 100
Húmedo	101 a 160
Súper húmedo	> 160

Nota: la fila sombreada indica el factor Lang para Bucaramanga. Adaptado a partir de Lang (IDEAM, 2005).

A su vez, en la Figura 18 se presenta la zona objeto de estudio con la correspondiente clasificación Caldas-Lang mediante código de colores, según estadísticos obtenidos del IDEAM.

Figura 18. *Clasificación Caldas-Lang para Bucaramanga.*

Elaboración a partir de IDEAM (2016).

4.1.2 Detección de Islas de calor y NVDI a partir de imágenes Landsat 8

La detección de islas de calor a partir de imágenes satelitales requiere la descarga de imágenes en los espacios de tiempo con mayores índices de radiación y temperatura, a partir de datos climatológicos exactos del territorio en estudio; por ello el estudio tiene un espacio de tiempo de seis años, entre el 2015 y el 2020, permitiendo un compilado certero de temperatura, radiación y humedad relativa.

La teledetección a partir de imágenes satelitales ayuda a caracterizar el espacio, en este caso los microclimas presentes que generan islas de calor en las ciudades. Las imágenes obtenidas desde el satélite Landsat 8 tiene una resolución de 30 metros (visible, NIR, SWIR), 100 metros (térmico) y 15 metros (pancromática), estas imágenes miden a partir de sensores longitudes de onda, guardando información en cada píxel que servirá a posteriori para analizar el espacio.

El satélite Landsat es monitoreado por la NASA, con misiones desde 1972 con Landsat 1, para monitoreo terrestre o militar, el Landsat 8 fue desarrollado en colaboración con el Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS y lanzado el 11 de febrero de 2013 (NASA, 2013).

Dentro del satélite Landsat 8, los sensores encargados de la detección son los OLI (*Operational Land Imager*) -TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), quienes registran la radiación electromagnética proveniente de la superficie de la tierra y los objetos, a través de longitud de onda; su fuente de energía es el sol, por ello son sensores pasivos, con una antena de recepción terrestre que permite el geoprocesamiento con Sistemas de Información Geográfica desde un centro de recursos.

El satélite Landsat 8 obtiene la información a partir de bandas espectrales visibles, infrarrojas y pancromáticas que permite detectar cirros en el cielo, revisar zonas costeras y fusionar bandas para cálculo de temperatura superficial, índice de cobertura vegetal, manejo de cultivos, monitoreo de incendios y otros estudios geológicos (Engelbreton, 2020).

La descarga de imágenes y el geoprocesamiento tuvo un riguroso paso a paso que se enuncia en la Tabla 8 desde la descarga del *GEOTIFF* que es el comprimido con la información de la imagen o *Metadato*, pasando por el corte de la zona objeto de estudio, hasta el análisis en QGIS.

Tabla 8. Procedimiento para descarga y análisis de imágenes Landsat 8

Ítem	Insumo/ herramienta	Descripción general	Resultado
1. Descarga de imágenes	URL de descarga: https://earthexplorer.usgs.gov/ (U.S. Geological Survey, s.f.)	Descarga de imágenes de la colección 1, nivel 1 Landsat 8 (Landsat colección 1, <i>level 1</i>) desde el portal de la USGS, con nubosidad máxima del 20%. Dirección de enlace: https://www.usgs.gov/ Landsat 8 OLI/TIRS C1 L1. Las imágenes descargadas pertenecen a los meses con máxima temperatura por año, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020.	Descarga de archivos comprimidos por día, por mes y año de mayor temperatura, en formato GEOTIFF cuyo archivo contiene las imágenes por banda y los metadatos con información específica de elevación del sol, hora de la toma de la imagen, radiación multibanda, entre otros.
2. Corte de la zona objeto de estudio	Insumo: Bandas desde GEOTIFF Software: SAGA	Apertura de bandas para georreferenciar la zona objeto de estudio. Creación de polígono alrededor de Bucaramanga con un	Clasificación en carpetas del área objeto de estudio de Bucaramanga en formato .sdatt

Ítem	Insumo/ herramienta	Descripción general	Resultado
		<i>shapefile</i> para posterior corte ráster en SAGA.	
3. Procesamiento de imágenes	Insumo: bandas cortadas en formato <i>sdatt</i> Software de procesamiento : RStudio	A partir de programación y fórmulas se realiza la combinación de las bandas 3,4,5 y 10 para detectar: - Cálculo de reflectancia TOA - Cálculo de la temperatura de brillo - Cálculo del NVDI – índice de diferencia normalizada de vegetación. - Detección de LSE – <i>land Surface emissivity</i>. - Detección de LST – <i>land Surface temperatura</i>. - Combinación de bandas para revisión de resultados. La información es procesada con base en la compilación de datos, obtenida en la clasificación y caracterización del territorio y los metadatos de las imágenes.	Obtención de imágenes procesadas a partir de los cálculos con los datos del archivo contenido en el GEOTIFF. Las imágenes se obtienen en formato .tiff. Organización de información por año desde el 2015 al 2020.
4. Superposición de imágenes con mayor temperatura	Insumo: archivos .TIFF obtenidas de RStudio Software: QGIS	Superposición de imágenes obtenidas de máxima temperatura en Bucaramanga para el 2015,2016,2017,2018,2019 y 2020. Ajuste de color por temperatura.	Imágenes en formato .jpg para estudio y análisis. 1. Análisis por comunas. 2. Análisis de arborización y su relación con las islas de calor. 3. Análisis de materiales con mayor absorción térmica.

El proceso de obtención de imágenes geoprocesadas se describe en el **Apéndice E. Geoprocesamiento de imágenes Landsat**. Toda la información obtenida partió de un análisis del territorio con datos climatológicos para los días de toma de imágenes y sus respectivos metadatos según la Figura 19.

Figura 19. *Compilado de datos para geoprocesamiento de imágenes Landsat 8. 2015-2020.*

DATOS PARA GEOPROCESAMIENTO DE IMÁGENES LANDSAT BUCARAMANGA - COLOMBIA						
DESCRIPCIÓN	2015	2016	2017	2018	2019	2020
LATITUD	7.09999722	7.09999722	7.09999722	7.09999722	7.09999722	7.09999722
LONGITUD	-73.11	-73.11	-73.11	-73.11	-73.11	-73.11
ALTITUD (Km)	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
HUMEDAD RELATIVA (%)	75.02	77.58	80.18	79.85	79.49	79.80
TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)	23.96	23.82	23.3	23.44	23.85	23.7
PRESIÓN ATMOSFÉRICA (mb)	902	904	904	904	904	904
IMAGEN LANDSAT						
IMAGEN ADQUIRIDA	D 2015-03-09	D 2016-03-11	D 2017-04-15	D 2018-02-13	D 2019-02-25	D 2020-02-03
HORA DE TOMA	15:11:36.6374050Z	15:11:48.4288000Z	15:11:24.1613690Z	"15:11:46.0448459Z"	"15:05:28.2519770Z"	"15:12:01.1912260Z"
DÍA JULIANO	68	71	105	44	56	34
ELEVACIÓN DEL SOL	59.16740636	59.76631178	64.16654769	54.31346951	56.67194598	52.53049639
RADIANCIA MULTIBANDA						
BANDA 10	3.34E-04	3.34E-04	3.34E-04	3.34E-04	3.34E-04	3.34E-04
BANDA 4	1.01E-02	1.01E-02	9.92E-03	1.02E-02	1.02E-02	1.03E-02
BANDA 5	6.20E-03	6.19E-03	6.07E-03	6.27E-03	6.24E-03	6.29E-03
BANDA 3	1.20E-02	1.20E-02	9.60E+01	1.22E-02	1.21E-02	1.22E-02
RADIANCIA ADITIVA						
BANDA 10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
BANDA 4	-50.67892	-5.06E+01	-49.61829	-51.23186	-50.98258	-51.42857
BANDA 5	-31.01297	-30.96377	-30.36392	-31.35134	-31.1988	-31.47172
BANDA 3	-60.09907	-60.00372	-58.84129	-60.75479	-60.45917	-60.98807
REFLECTANCIA (cuadro)						
BANDA 4	1603	1603	1603	1603	1603	1603
BANDA 5	972.6	972.6	972.6	972.6	972.6	972.6
TOA SEGÚN TABLA						
CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA SEGÚN CÁLCULO (W/m ² /sr/um)						
DRAD	5.18	5.11	5.48	4.42	3.53	4.36
ULRAD	3.39	3.34	3.61	2.83	2.2	2.8
CONSTANTES BANDA 10						
K1	774.8853	774.8853	774.8853	774.8853	774.8853	774.8853
K2	1321.0789	1321.0789	1321.0789	1321.0789	1321.0789	1321.0789
DATOS PARA EL DÍA - OBTENIDOS DEL IDEAM						
TEMPERATURA DÍA IMG SATELITAL -To (°C)	25.96	25.98	23.73	24.083	25.108	24.45
HUMEDAD RELATIVA DÍA IMG SATELITAL (%)	65.23	61.19	78.56	70.46	54.40	72.90

Nota: Los datos han sido tabulados y obtenidos del 2015 al 2020. Elaboración propia a partir de información obtenida del IDEAM y metadatos de imágenes Landsat 8.

Las islas de calor urbano –ICU se perciben en las imágenes año por año, con las respectivas temperaturas que oscilan por encima de la media entre los 28 °C y 36 ° C.

Para ubicar con exactitud los puntos de islas de calor urbano en la ciudad de Bucaramanga, se realizó una superposición de las mismas, sobre las comunas de Bucaramanga, teniendo en cuenta la demarcación urbana existente en el repositorio de planeación Municipal, que permitió identificar las zonas de espacio público a intervenir, según caracterización previa basada en el POT de Bucaramanga 2014-2027 (Municipio de Bucaramanga, 2014).

La división política urbana de la ciudad es entonces la que se muestra en la Tabla 9 y Figura 20, sobre la cual se superpusieron los puntos con mayor temperatura en la Figura 22 y se caracterizaron por actividad comercial y por porcentaje de población.

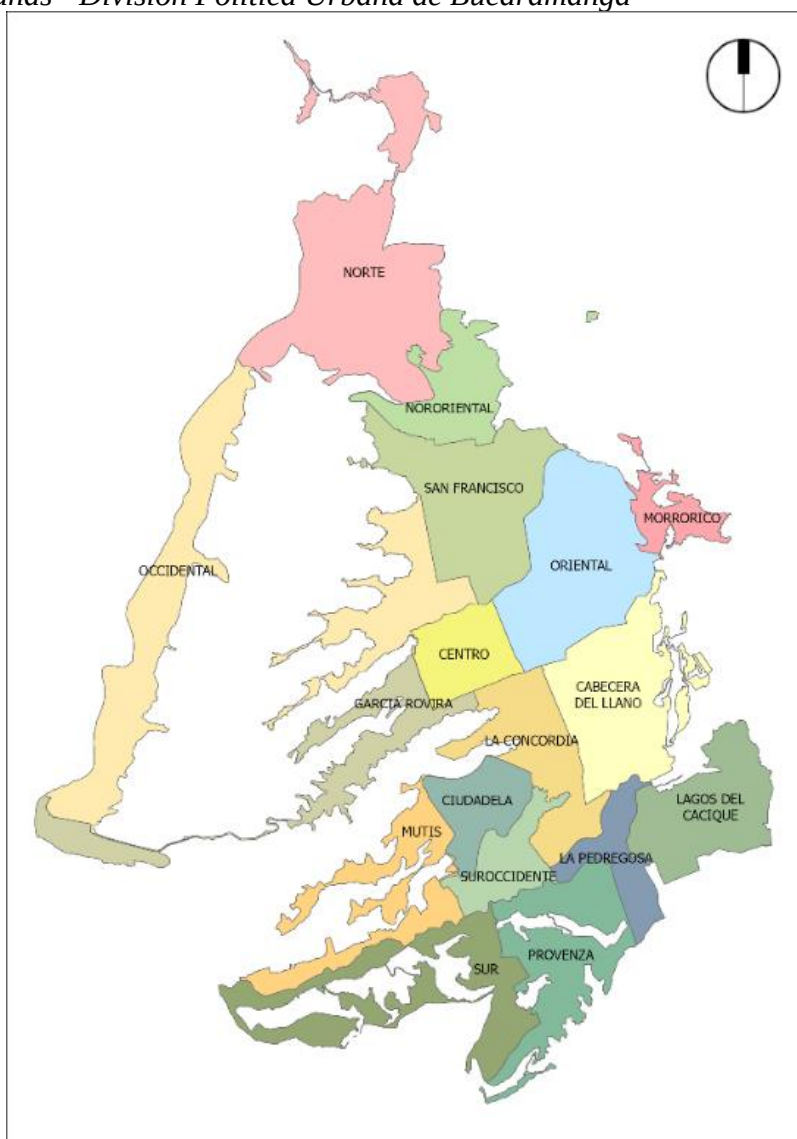
De acuerdo con la información contenida en el Plan de Desarrollo de la Ciudad, la ciudad consta de 17 comunas, cuyos datos de población y extensión aparecen en la Tabla 9.

Tabla 9. *División Política Urbana de Bucaramanga*

Comuna	% habitantes	Habitantes	Área (ha)
Comuna 1 (Norte)	10,31%	61.583	438.34
Comuna 2 (Nororiental)	6,66%	39.781	137.14
Comuna 3 (San Francisco)	8,49%	50.712	273.47
Comuna 4 (Occidental)	7,26%	43.365	138.72
Comuna 5 (García Rovira)	8,01%	47.845	568.83
Comuna 6 (La Concordia)	5,35%	31.956	192.88
Comuna 7 (Ciudadela)	5,50%	32.852	107.93
Comuna 8 (Sur Occidente)	3,50%	20.906	105.8
Comuna 9 (La Pedregosa)	3,15%	18.815	89.25
Comuna 10 (Provenza)	6,14%	36.675	260.94
Comuna 11 (Sur)	5,41%	32.315	321.5
Comuna 12 (Cabecera del Llano)	6,35%	37.93	282.56
Comuna 13 (Oriental)	9,94%	59.373	300.24
Comuna 14 (Morrorrico)	4,36%	26.043	71.13
Comuna 15 (Centro)	1,64%	9.796	103.65
Comuna 16 (Lagos del Cacique)	2,85%	17.024	199.85
Comuna 17 (Mutis)	5,08%	30.344	338.33
Total	100%	597.316	3930.56

Elaboración propia a partir de datos Alcaldía de Bucaramanga (2020).

En la Tabla 9 se listan e identifican las 17 comunas presentes en el área urbana de Bucaramanga, donde se caracterizará el espacio público del territorio según el uso de suelo obtenido del POT, asimismo, se identifican las áreas peatonales (con sus perfiles viales) con mayor afectación de las islas de calor, dentro de las redes de infraestructura vial como componentes construidos del subsistema de elementos constitutivos del espacio público.

Figura 20. *Comunas - División Política Urbana de Bucaramanga*

Elaboración propia a partir de POT- Bucaramanga (Municipio de Bucaramanga, 2014).

Dentro de la división política Urbana – organización por comunas- se dispusieron las islas de calor compiladas del 2015 al 2020 para detectar la zona exacta de microclima en la ciudad.

La superposición de imágenes del 2015 al 2020 reflejó los puntos de mayor afectación por máximas temperaturas. Las zonas en rojo llegan a superar los 36 °C de temperatura entre las 3:05 pm y las 3:12 pm, de acuerdo con el momento de toma de imagen por el satélite. Cabe aclarar que las máximas temperaturas registradas en Bucaramanga oscilan entre las 12:00 del mediodía y la

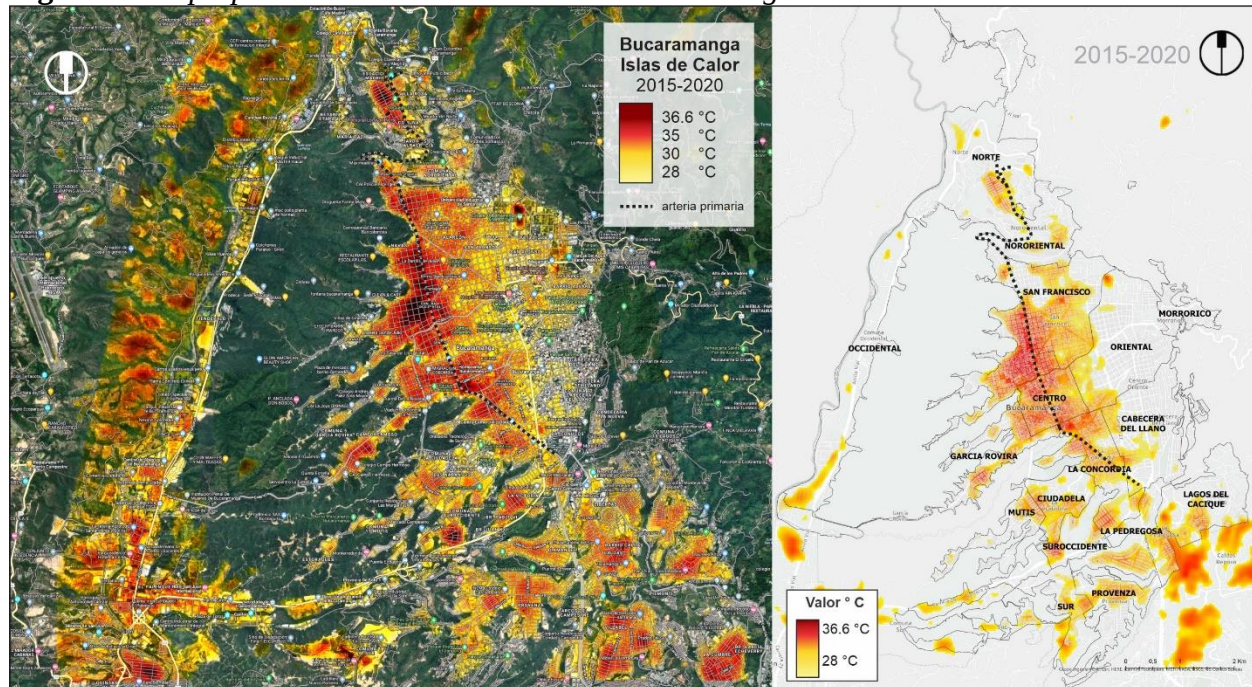
1:00 pm, sin embargo, el satélite realiza el registro en la zona oriente de Colombia- Bucaramanga sobre las 3:00 de la tarde y el procesamiento se realiza sobre ese rango de tiempo.

Para los años 2015, 2016, 2017, 2018 y 2020, la temperatura de las zonas con mayor afectación alcanzó 33.79 °C sobre las comunas norte, occidental, centro y la concordia principalmente. La temperatura media para Bucaramanga según datos tabulados desde el 2015 al 2020 fue de 23.7 ° C, lo que indica que la isla de calor en esas zonas alcanzó a superar la media en 10.09° C.

Para febrero del año 2019 se evidencia una mayor temperatura que abarca la generalidad de las comunas de la ciudad de Bucaramanga, formándose inclusive en la cuchilla Palo Negro, entre el aeropuerto Palo Negro de Bucaramanga y la zona industrial de Bucaramanga, sobre la vía a Girón, en las zonas con poca o nula vegetación. El año 2019 evidencia una temperatura en la ciudad que alcanza los 36.6°C (12.8 °C por encima de la media del 2019, que fue 23.8°C), con mayor atenuación sobre las comunas Norte, San Francisco, Occidental y Centro de la ciudad.

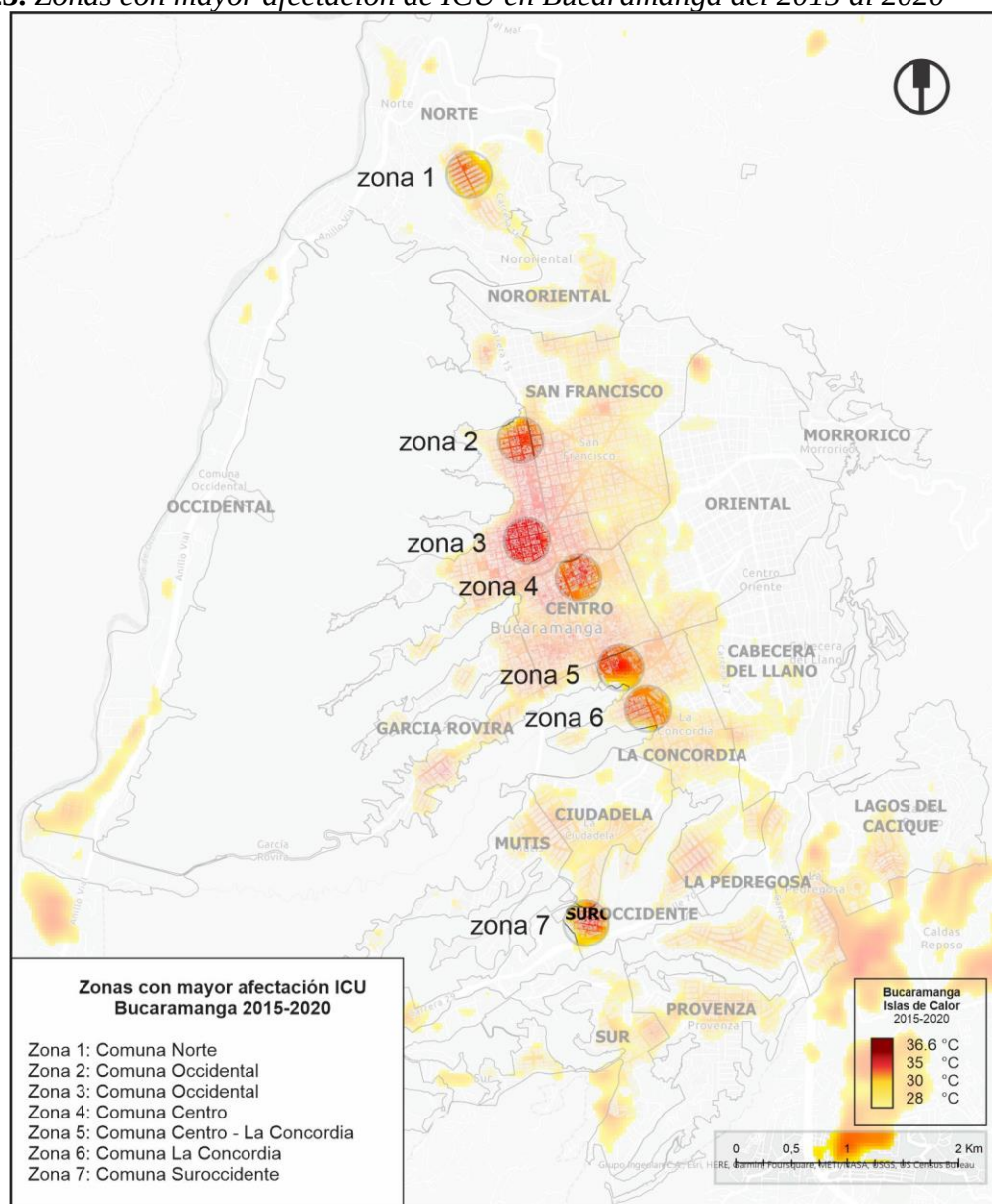
Fue pertinente registrar las zonas con mayor afectación y generación de microclimas en la ciudad, para la caracterización de materiales actuales que generan máximas temperaturas en la ciudad, versus la arborización existente e índice de cobertura natural –NVDI por años que se evaluó en el tercer objetivo.

Para la ubicación exacta de las zonas con mayor afectación se realizó la yuxtaposición de imágenes del 2015 al 2020, demostrando máximas temperaturas sobre una de las arterias principales de Bucaramanga que desde el norte conecta a Bucaramanga con la vía Nacional al norte del país – vía al mar, pasando posteriormente por las comunas occidental y centro como carrera 15, para proyectarse hacia el suroriente como diagonal 15 sobre el sector del Éxito de la Rosita en la comuna La Concordia.

Figura 22. *Superposición de Islas de Calor en Bucaramanga del 2015 al 2020.*

Gracias a la combinación de bandas 3,4,5 y 10 de las imágenes satelitales Landsat 8 fue posible geoprocesar y detectar las zonas con mayor afectación por temperaturas y radiación en Bucaramanga desde el 2015 al 2020. De la revisión general del territorio se identificaron 7 zonas con mayor afectación de ICU, que se aprecian en la Figura 23 y fueron punto de partida para la solución del objetivo 3.

Figura 23. Zonas con mayor afectación de ICU en Bucaramanga del 2015 al 2020



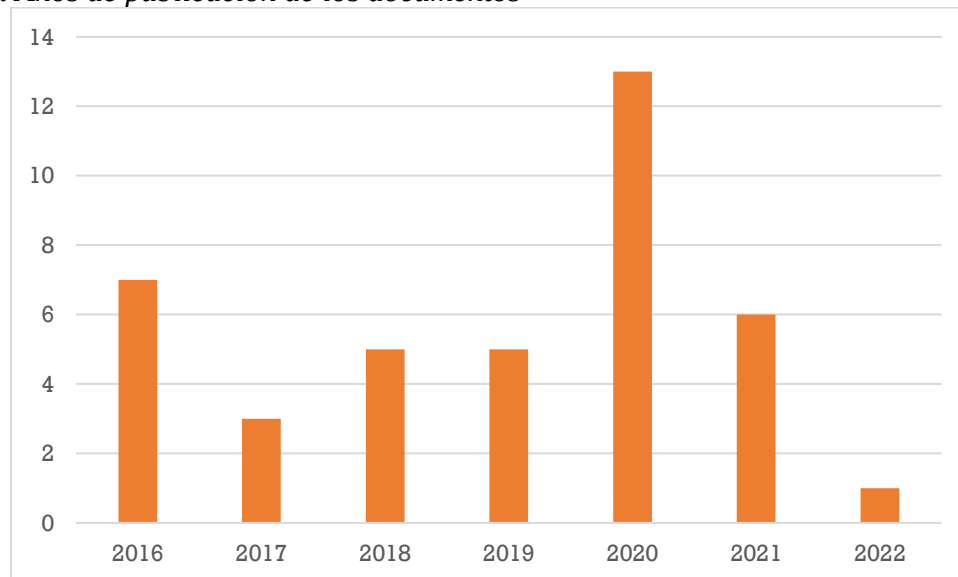
Las 7 zonas detectadas superan temperaturas de 28 °C para los 6 años consecutivos de 2015 al 2020 y pertenecen en su mayoría a la comuna Occidental, la Comuna Centro y comuna La Concordia.

4.2 Propiedades asociadas a los materiales reductores de absorción térmica

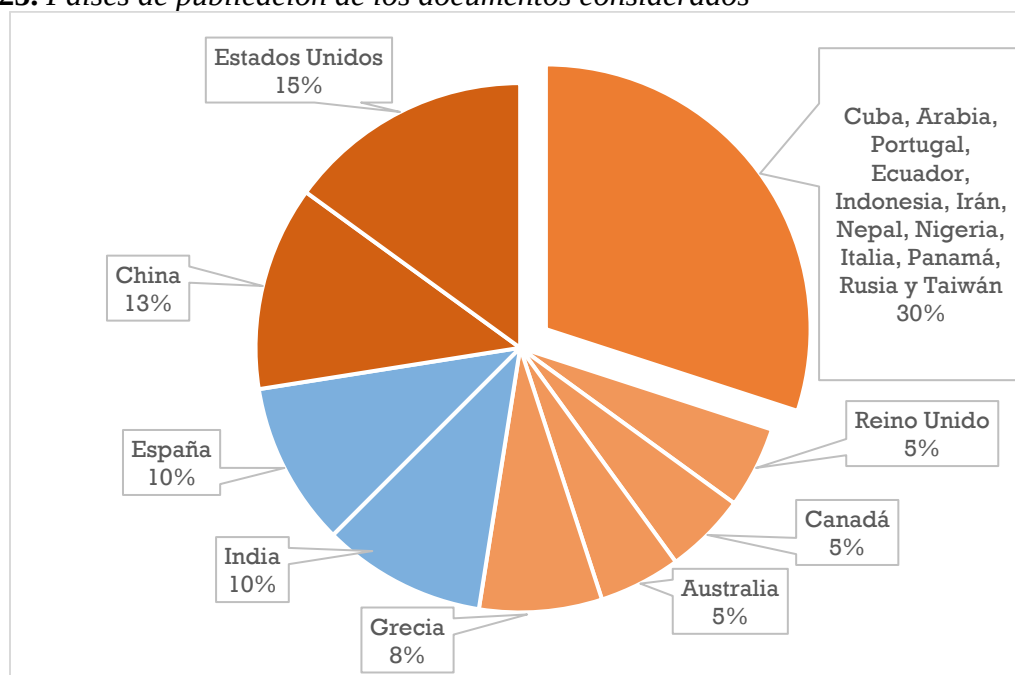
De acuerdo con la metodología de búsqueda sistemática de información descrita anteriormente, en la primera fase de preselección de publicaciones se obtuvieron 40 documentos que superaron los criterios de inclusión y exclusión como se evidencia en el **Apéndice F. Preselección de publicaciones.**

La distribución de estos documentos según los años en que se publicaron se muestra en la Figura 24.

Figura 24. Años de publicación de los documentos



Es decir que la mayor cantidad de publicaciones fueron del año 2020, seguida por las de 2016. Así, la clasificación de las publicaciones de acuerdo con el país de origen se presenta en la Figura 25.

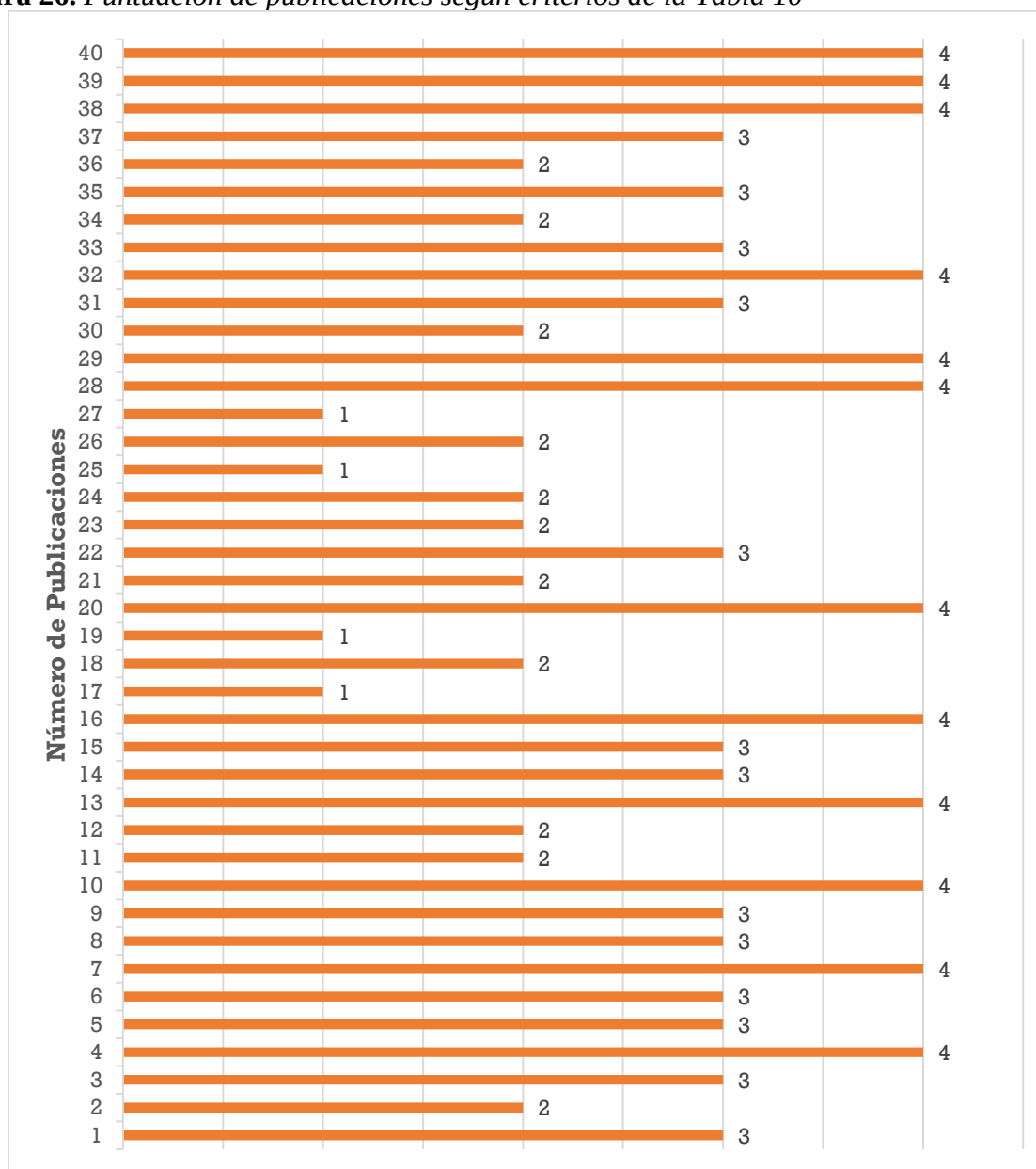
Figura 25. Países de publicación de los documentos considerados

Puede verse que Estados Unidos, China, España e India fueron los países que mayor contribución hicieron a las publicaciones consideradas.

Esas publicaciones fueron evaluadas de acuerdo con los criterios de calidad señalados en el **Apéndice G. Evaluación de las publicaciones**. Aquellas que recibieron mejor puntaje fueron analizadas a detalle, en total 12 publicaciones que arrojaron resultados de relevancia para el estudio de materiales y afectación por ICU, desde 4 criterios descritos en la Tabla 10.

Tabla 10. Criterios de evaluación de calidad

Criterio	Descripción	Puntaje
Bases del estudio	El estudio se basa en información obtenida en fuentes primarias	1
Aplicación del estudio	Los resultados del estudio fueron aplicados y probados	1
Sustento teórico	El estudio contiene sustento teórico	1
Aplicabilidad del estudio	El estudio ha sido probado en más de un escenario	1

Figura 26. Puntuación de publicaciones según criterios de la Tabla 10

De acuerdo con la metodología prevista, en esta sección del trabajo se presentan los hallazgos obtenidos en la búsqueda sistemática de literatura realizada en relación con los materiales que han sido estudiados para reducir la absorción térmica y mitigar los efectos de las Islas de calor. A continuación, se describen las estrategias o hipótesis de las 12 publicaciones relevantes con sus respectivos resultados y hallazgos.

Tabla 11. *Estrategias y resultados de publicaciones*

Número	Autor(es) año-país	Título	Estrategia/ Hipótesis	Resultado
4	Godbole, S. y Bhargava, R. (2016)	Understanding the factors contributing in the formation of 111 canopy level urban heat island - a case study of Nagpur city	Revisión de relación existente entre la temperatura del aire de los cañones de edificaciones, la vegetación y los materiales superficiales en Nagpur.	El estudio en Nagpur arrojó que los materiales son los más relevantes en el aumento de la temperatura dentro de los cañones de la calle. Las superficies horizontales con bajo albedo tuvieron protagonismo en el aumento de las ICU.
7	Wang, Y., Berardi, U., y Akbari, H. (2016)	Comparing the effects of Urban Heat Island Mitigation Strategies for Toronto, Canada	En Toronto- Canadá a partir de la temperatura de la superficie, la temperatura del aire exterior, la temperatura radiante media y la temperatura fisiológica Pavimento frío con mayor albedo superficial y menor capacidad calorífica Techo frío, aumentar el albedo del techo para reducir la temperatura de superficie del techo Aumento del 10% en la vegetación urbana Modelo de Ciudad fresca	La combinación de las 3 técnicas de techo frío, aumento de la vegetación y ciudad fresca podría reducir de 3.3 a 4.6°C la temperatura fisiológica equivalente-PET Reducción de temperatura en 7.9 °C al mediodía La reducción de la temperatura superficial reduce las emisiones térmicas Reducción en la temperatura del aire exterior entre 0,5 y 0,8 °C Reducción de la temperatura fisiológica equivalente en un 1.8 °C
10	Sánchez Sánchez, C., Núñez Peiró, M. y Neila González, F. J. (2017)	Isla de calor urbana y población vulnerable. El caso de Madrid	Revisión de Islas de Calor Urbana y población vulnerable en Madrid - España.	Los resultados evidencian en algunos sectores de mayor ICU zonas de gran vulnerabilidad económica, lo que supone un riesgo de salud para las personas que allí habitan, por ello el estudio demuestra la importancia de la temperatura a escala urbana para la regeneración de diversos barrios en la ciudad de Madrid en procura del confort térmico.
13	Simón Grau, J. y López Ayerra, J. (2018)	Pavimentos reflectantes para la mitigación del cambio climático	Mitigar las ICU a partir de pavimentos reflectantes en Murcia - España	Los pavimentos con áridos calizos con menor porosidad y menor tamaño de los áridos serán más reflectantes contribuyendo a la disminución de calor en zonas urbanas.
16	Chatterjee, S., Khan, A., Dinda, A., Mithun, S., Khatun, R., Akbari, H.,	Simulating micro-scale thermal interactions in different building	Pavimento Frío (Calcuta - India) Techo frío	En espacios con edificaciones de poca o media altura, presentan efectos térmicos mayores No ofrece una contribución significativa en la reducción de temperatura

Número	Autor(es) año-país	Título	Estrategia/ Hipótesis	Resultado
20	Kusaka, H., Mitra, C., Bhatti, S. S., Van Doan, Q. y Wang, Y. (2019)	environments for mitigating urban heat islands	Vegetación urbana agregada Ciudad fresca	Esta estrategia da una máxima reducción de temperatura ambiente Los resultados con esta estrategia fue la obtención del mejor confort biofísico.
	Yu, Z., Yao, Y., Yang, G., Wang, X. y Vejre, H. (2019)	Strong contribution of rapid urbanization and urban agglomeration development to regional thermal environment dynamics and evolution	Caso de estudio Pearl River Delta- China: Contribuciones de la urbanización y el desarrollo de aglomeraciones en la dinámica del entorno térmico regional (RTE) y en el aumento de la temperatura. Hipótesis: se puede planificar la adaptación climática	La urbanización aumentó en los últimos 20 años reduciendo drásticamente las zonas verdes. Los terrenos ecológicos producen un enfriamiento térmico de las ciudades y la reducción de las ICU. Se puede generar una relación entre la tasa de urbanización y la temperatura para ajustar la curva ambiental de Kuznets.
28	Salami Magar, D., Salami Magar, R. K. y Chidi, C. L. (2021)	Assessment of urban heat island in Kathmandu valley	Hipótesis: el retiro de coberturas verdes ha aumentado las ICU en Nepal. El retiro de zonas vegetales y cubiertas verdes permeables a otros materiales duros han alterado el equilibrio de la energía térmica en Katmandú.	A partir de simulaciones y cálculos para hallar la temperatura superficial del valle de Katmandú se concluyó que el aumento de carreteras, vehículos y superficies duras aumenta las ICU. A mayor urbanización mayor sumado a actividades urbanas inciden en el aumento de las ICU
29	Huang, J. M. y Chen, L. C. (2020)	A Numerical Study on Mitigation Strategies of Urban Heat Islands in a Tropical Megacity: A Case Study in Kaohsiung City, Taiwan	Estudio de caso: una manzana en Taiwán para revisar 5 estrategias: Cambio a pavimento permeable Aumento de cobertura Verde Cambio a pavimento permeable y aumento del índice de cobertura verde (GCR) al 60%. Cambio a pavimento permeable, aumento al 60% del GCR y aumento del GCR en parques al 80%. Cambio a pavimento permeable con aumento al 60% de GCR en la calle, 80% en los parques y un 100% en cubiertas de edificios públicos	Los resultados obtenidos con estas estrategias muestran que con un aumento del 10% de cobertura natural en andenes la temperatura se reduce en 0.15% Esta estrategia otorgó la máxima reducción en 2 °C la temperatura.
32	Urrutia del Campo, N. Neila González, J. (2019)	Bioclimática, mediciones ambientales y uso de los espacios	Estudio de Caso: plaza Chamberí de Madrid, a partir de modelamiento de edificaciones, vías, mobiliario, arborización, se	Es importante entonces el análisis higrotérmico, de vegetación, de materiales y sombreado en el espacio público a fin de generar

Número	Autor(es) año-país	Título	Estrategia/ Hipótesis	Resultado
		urbanos: Evaluación comparativa en la Plaza de Chamberí, Madrid	pretende simulaciones de asoleamiento y radiación solar	matices que permitan confort y un mayor relacionamiento social.
38	Gómez Concepción, H., Rojas Márquez, I. y Perén Montero, J. I. (2021)	Una aproximación a los efectos del diseño urbano en el microclima y calidad de espacios urbanos de una ciudad cálida- húmeda: Panamá	Detección de ICU en ciudad de Panamá a fin de analizar movilidad, diseño urbano y microclima sobre la interacción de peatones y calidad del espacio en el sector de Santa Ana	Determinó la importancia del estudio de los microclimas en el diseño urbano, con su respectivo comportamiento de movilidad de peatones en el espacio público de ciudades con clima cálidos húmedos
39	Spalierno M. (2021)	Estudio de materiales termocrómicos innovadores: Análisis de mitigación de la isla de calor	Simulaciones con materiales que cambian sus propiedades físicas de color (termocrómicos) para favorecer la reducción de Islas de Calor en verano e invierno. El estudio se generó en Bari - Italia	Los materiales termocrómicos favorecen la reducción de ICU disminuyendo las temperaturas atmosféricas y superficiales en verano, sin embargo, hay un evidente deterioro ante los rayos UV del material polimérico sumado al alto costo.
40	Kalogeropoulos, G., Dimoudi, A., Toumboulidis, P., Zoras, S. (2022)	Urban Heat Island and Thermal Comfort Assessment in a Medium-Sized Mediterranean City	Analizar por teledetección las ICU en una ciudad de tamaño medio (Grecia- Atenas), que afectan el confort exterior	Se detectaron las ICU en relación de la capa de dosel y temperaturas de superficie de los elementos circundantes como los materiales, así como ausencia de vegetación en el área de interés y los caminos estrechos. Factores relevantes en las ICU la temperatura del aire y la radiación solar.

Como se observa en esta revisión de literatura, existen investigaciones que sugieren el empleo de materiales modificados para la fabricación de las cubiertas de vías a fin de mitigar los efectos de las islas de calor urbano. Adicionalmente, el uso de estos materiales se puede combinar con algunas técnicas de siembra de árboles, especialmente en sectores en donde los edificios tienen una altura limitada, junto con la orientación de las vías según la dirección predominante del viento, que también contribuirá a refrescar el clima y aumentar la sensación de confort de los peatones y residentes en general.

Principalmente se definen desde la revisión sistemática materiales verdes, permeables con porosidades o cavidades que garanticen la escorrentía y la evaporación por intercambio térmico con el subsuelo evitando la transmitancia térmica en zonas templadas; asimismo, es conveniente el uso de materiales reflectantes que permitan disminuir la radiación. Con un albedo menor en un material la capacidad de reflexión será mayor y mitigará drásticamente la absorción y transmisión de calor, logrando desde materiales con superficies claras y menor inercia térmica la reducción óptima en los elementos que conforman las urbes.

4.3 Materiales existentes en la región que reúnen las propiedades asociadas a la reducción de absorción térmica

Para identificar los materiales apropiados en la región que propendan por la mitigación de las ICU dentro del territorio, es importante ahondar en la revisión de las variables que intervienen en la generación de los microclimas. Inicialmente se estudió el espacio urbano en Bucaramanga en las 7 zonas afectadas con altas temperaturas a fin de recomendar un material idóneo que permita mitigar las ICU en el territorio Bumangués.

Desde el resultado del objetivo 1, se pudo identificar 7 zonas con altas temperaturas en la ciudad de Bucaramanga. Esta detección de las ICU a partir de imágenes satelitales Landsat 8 arrojó resultados para su análisis, desde la ubicación de cada zona por comunas, la relación de arborización existente y los materiales actuales en las zonas con mayor afectación.

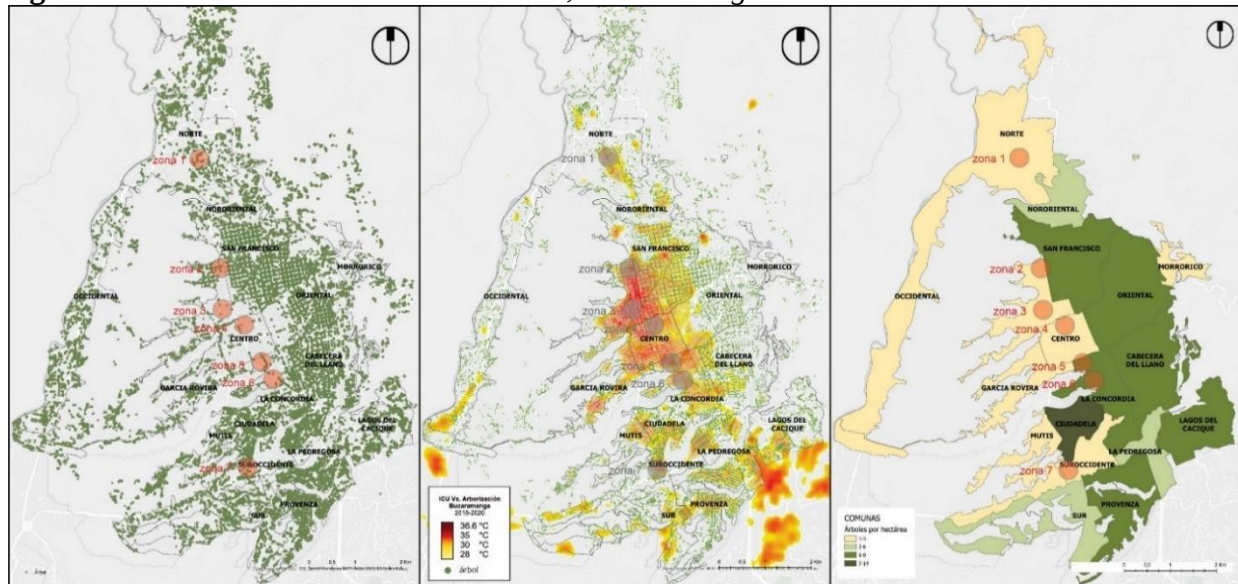
Se puede determinar entonces desde los resultados de revisión sistemática del objetivo 2, que las variables que intervienen en la creación de zonas de mayores radiaciones por albedo están directamente relacionadas al calor antropogénico producto de las actividades del ser humano en el territorio, el porcentaje arborización con su NVDI y los materiales del espacio.

El estudio en particular se centra en la materialidad del territorio, sin embargo, se realiza una valoración general en cuanto a las 2 variables de vegetación y actividades en el territorio, que darán paso a estudios posteriores.

A destacar, la mayoría de las zonas detectadas con ICU se encuentran cercanas a la carrera 15 de la ciudad de Bucaramanga, considerada arteria principal que desde la zona noroccidente conduce al sur oriente de la ciudad.

Dentro del estudio fue imprescindible la revisión de cobertura natural en el territorio y el estado de la arborización que afecta en gran medida la creación de microclimas e ICU en la ciudad de Bucaramanga. La arborización en la ciudad se identificó con mayor claridad a partir de la creación de una densidad *Kernel* desde SIG Arcgis basado en el POT de 2014, donde se visualizó la distribución arbórea exacta por comuna, correlacionando las ICU detectadas para los años 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020 (Figura 27. *Zonas con arborización Vs. ICU, Bucaramanga 2015 al 2020*).

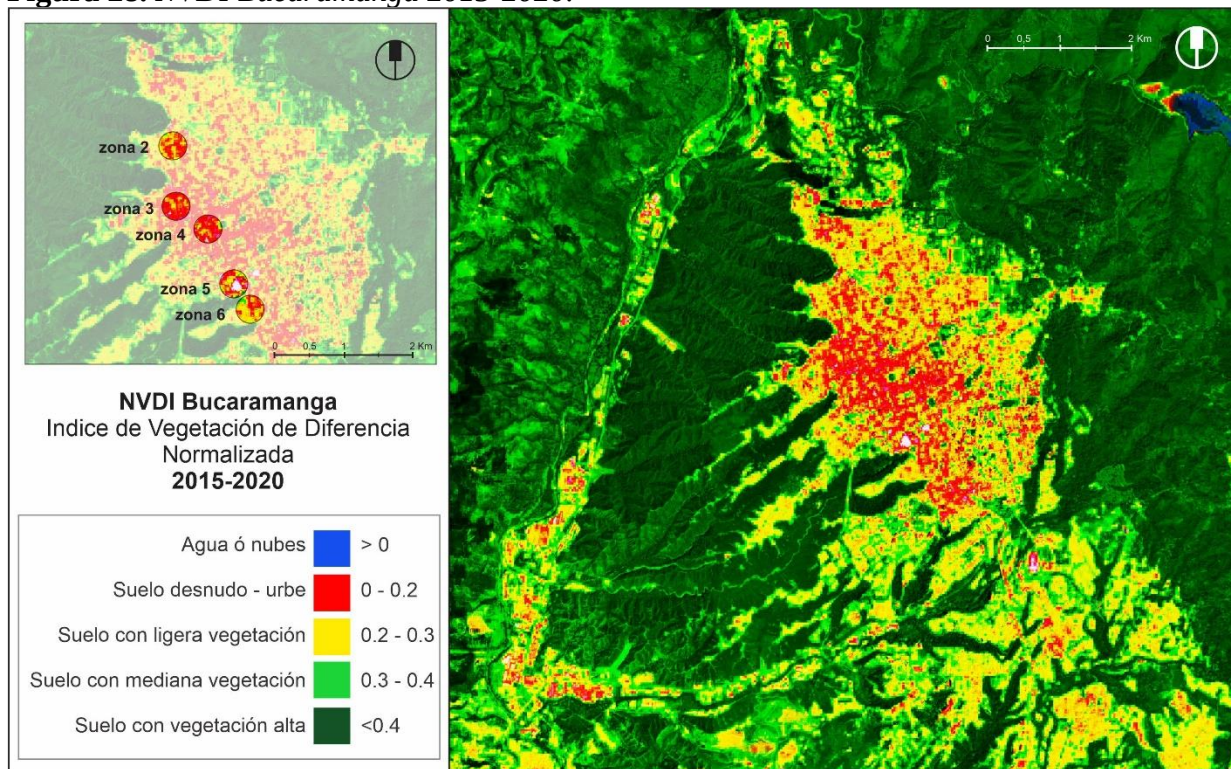
Figura 27. Zonas con arborización Vs. ICU, Bucaramanga 2015 al 2020.



Elaboración a partir de densidad *Kernel* en SIG - ARCGIS basado en el POT, 2014 para la ciudad de Bucaramanga.

Se logró identificar que las zonas detectadas con mayor afectación por ICU son las que presentan menor arborización con una cantidad de árboles por hectárea, de aproximadamente 1 a 3, como se evidencia en la zona 1, zona 2, zona 3, zona 4 y zona 7 de la Figura 27.

A partir de geoprocesamiento de las imágenes Landsat 8 desde 2015 al 2020, se logró determinar el índice de vegetación de diferencia normalizada – NVDI, que indicó con información por píxel para los meses con mayor radiación y temperatura las zonas con suelos desnudos, poca o ligera vegetación y vegetación densa para Bucaramanga. La detección del NVDI permitió identificar el índice de cobertura vegetal- ICV a través de la radiación absorbida por la vegetación versus la radiación incidente. Para los valores entre 0 y 0.2 se determinaron suelos desnudos, endurecidos y con ligera vegetación; los suelos con vegetación por encima de los 0.4 indican una vegetación densa en óptimas condiciones de salud.

Figura 28. *NVDI Bucaramanga 2015-2020.*

Elaborado a partir de geoprocesamiento con *R-Studio* y *SIG QGis*.

Desde la revisión de la variable relacionada con las ICU y la poca arborización o cobertura natural del territorio, se identificaron las zonas 2,3,4,5 y 6 con poca arborización y NVDI de 0 a 0.2 indicando suelos prácticamente desnudos, con mayor énfasis en las zonas 3 y 4.

Asimismo, la variable de materialidad se analizó desde cada perfil a través de imágenes satelitales y un posterior sobrevuelo sobre la zona con mayor afectación con dron de referencia DJi Mavic 2 Pro (ver Apéndice J. *Imágenes de sobrevuelo con dron zona 2 y zona 3*); a fin de caracterizar los materiales en el espacio.

Dentro del territorio fueron analizadas las 7 zonas, dada su materialidad en espacio público a partir de cartografía catastral obtenida del IGAC (Apéndice H. *Caracterización de Materiales*). Se tomaron los materiales directamente relacionados con la radiación y máximas temperaturas de mayor registro en la zona horaria del mediodía, donde los rayos del sol se emiten de manera

perpendicular sobre cubiertas y espacio público. De allí se registraron sobre el perfil y el área de cada zona los materiales de superficies horizontales a modo de caracterización del espacio.

4.3.1 Zona 1 Comuna Norte

Como se aprecia en la Figura 29 se encuentra **Figura 29. Zona 1 comuna Norte. Ubicación, isla de calor y uso del suelo.** ubicada en la comuna norte con una elevación de 737 msnm. Es un sector residencial con actividad económica, dotacional y comercial de servicios livianos. Sobre las calles 16N y 17 N con carrera 12, se encuentran ubicados el centro de salud Kennedy, la plaza de mercado, la cancha sintética del sector y sobre la calle 23N el colegio Maiporé. Sobre la vía a Café Madrid se encuentran almacenes de cadena y parqueaderos para camiones de carga. El sector localizado se encuentra rodeado por vías principales de la ciudad como la Carrera 15 y la vía Nacional que de Bucaramanga conduce a San Alberto, con un alto carreteo vehicular. Cuenta según POT,2014 con 140.5 habitantes por hectárea.

Dentro de la zona 1 el perfil con mayor radiación ubicado se encuentra en la Carrera 12 Con calle 21 N.

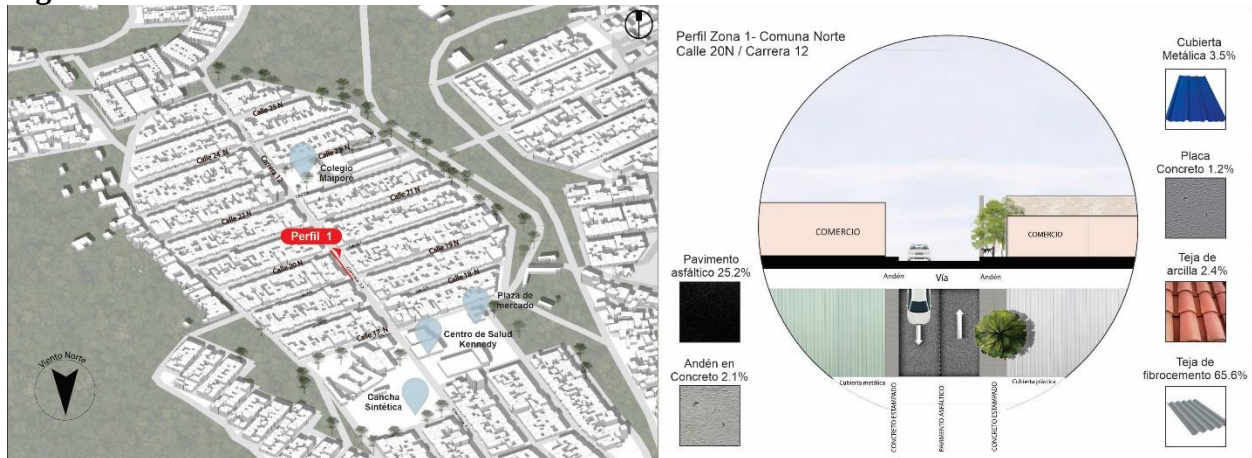
Figura 29. Zona 1 comuna Norte. Ubicación, isla de calor y uso del suelo.



Adaptado de Google Earth y POT (Alcaldía de Bucaramanga, 2021b).

Para la zona 1 los materiales predominantes por hectárea están distribuidos así: pavimento asfáltico y concreto en el espacio público en un 27.3%; las cubiertas relacionadas con áreas privadas pertenecientes a viviendas y zonas de comercio por la Carrera 12 con un 72.7% como se percibe en la Figura 30.

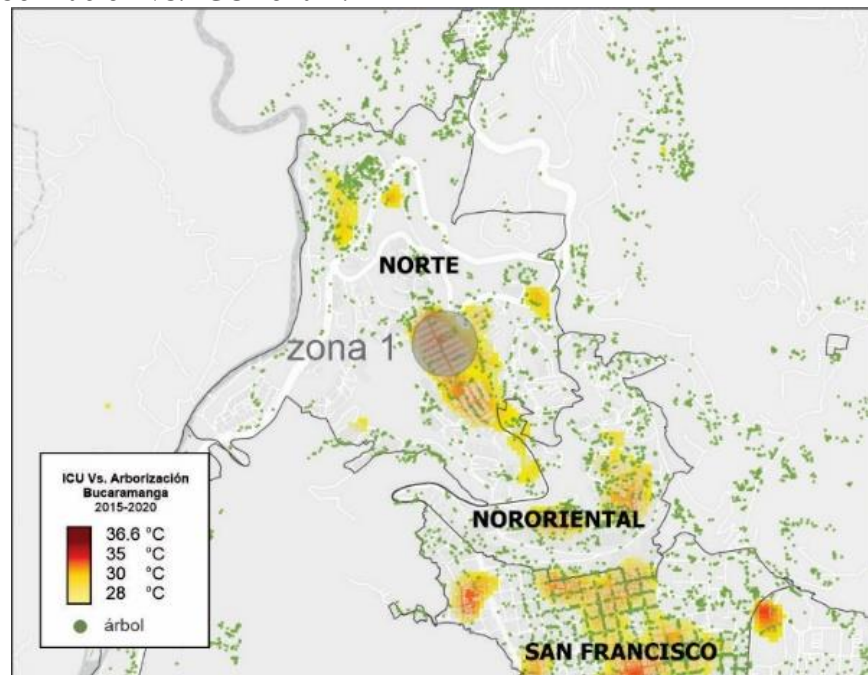
Figura 30. Caracterización de materiales Zona 1.



Adaptado de Google Earth y POT (Alcaldía de Bucaramanga, 2021b).

Es evidente la poca vegetación del espacio urbano y el alto porcentaje de zonas endurecidas que contribuye a la generación de microclimas en el sector, sumado a la cercanía de la vía Nacional que de Bucaramanga conduce a San Alberto por donde transitan vehículos de cargas de varios ejes.

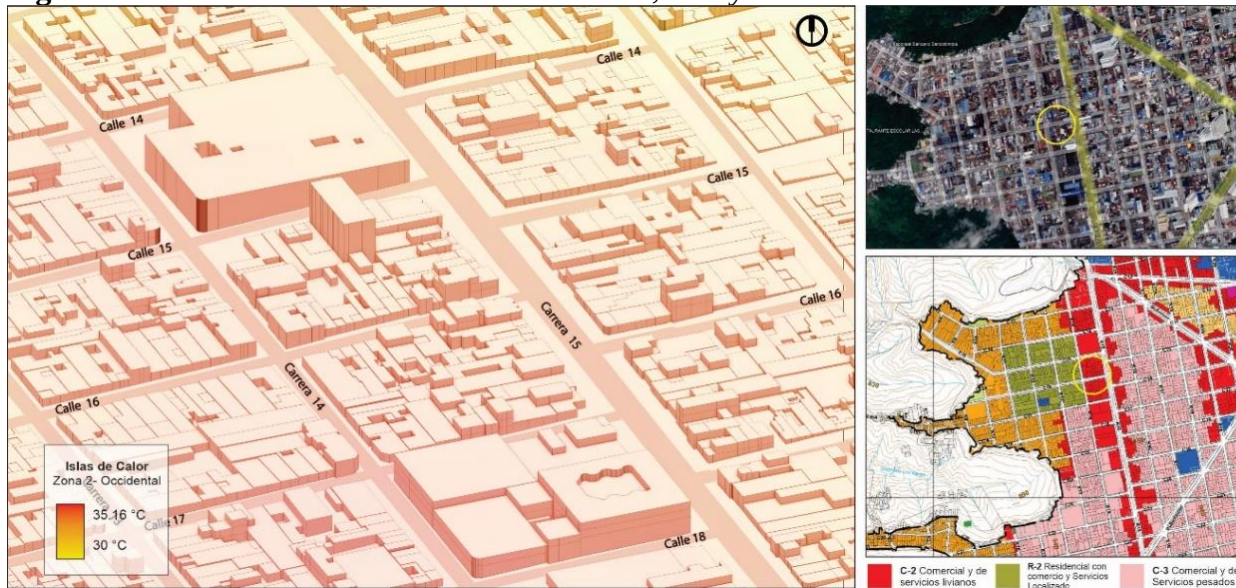
Figura 31. Arborización Vs. ICU zona 1.



4.3.2 Zona 2 Comuna Occidental

Acorde a la **Figura 32** la zona 2 se halla en el barrio Gaitán sobre la calle 16 entre carrera 14 y 15, con una elevación de 945 msnm; es un sector comercial y de servicios livianos según el POT, 2014. Hacia la carrera 14 se transforma en un sector residencial con comercio y servicios localizados o actividad económica. Se encuentra sobre la carrera 15, arteria primaria que conduce al mar. En dicho sector se encuentran empresas comerciales de servicios pesados, donde la mayor temperatura se registró sobre la calle 16 con 35.16 °C.

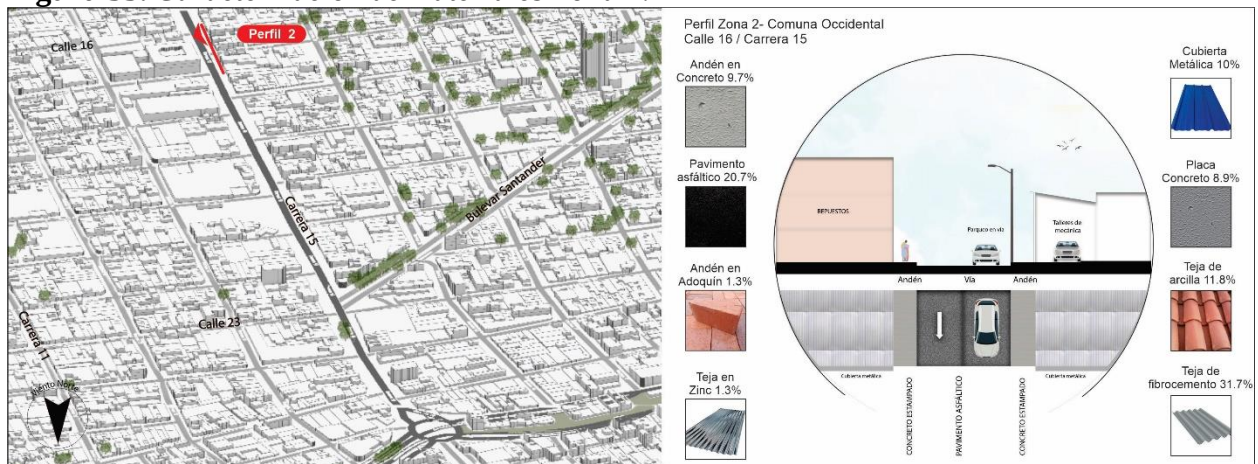
Figura 32. Zona 2 comuna Occidental. Ubicación, ICU y uso del suelo.



Adaptado de Google Earth y POT (Alcaldía de Bucaramanga, 2021b).

Los materiales para la zona 2 se encuentran en un 31.7% de pavimento asfáltico en la vía, concreto en el andén y adoquín de gres dispuesto igualmente en senderos peatonales de la carrera 15; para las zonas privadas de comercio sobre la calle 16 las cubiertas arrojaron un 68.3% por hectárea, con una mayoría de tejas en fibrocemento.

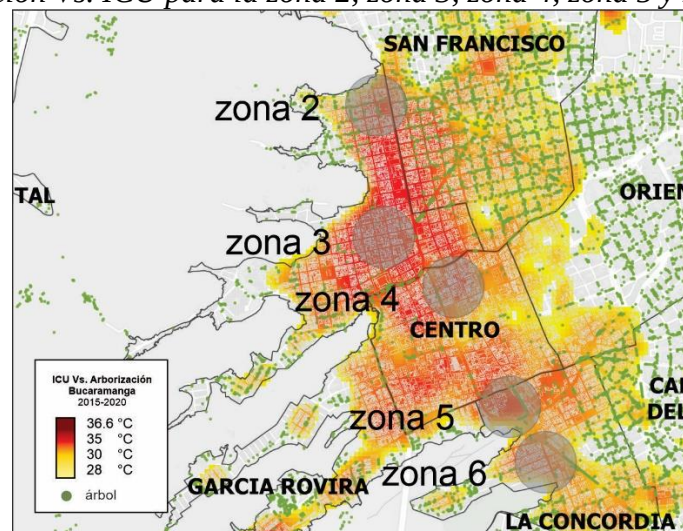
Figura 33. Caracterización de materiales Zona 2.



Adaptado de Google Earth y POT (Alcaldía de Bucaramanga, 2021b).

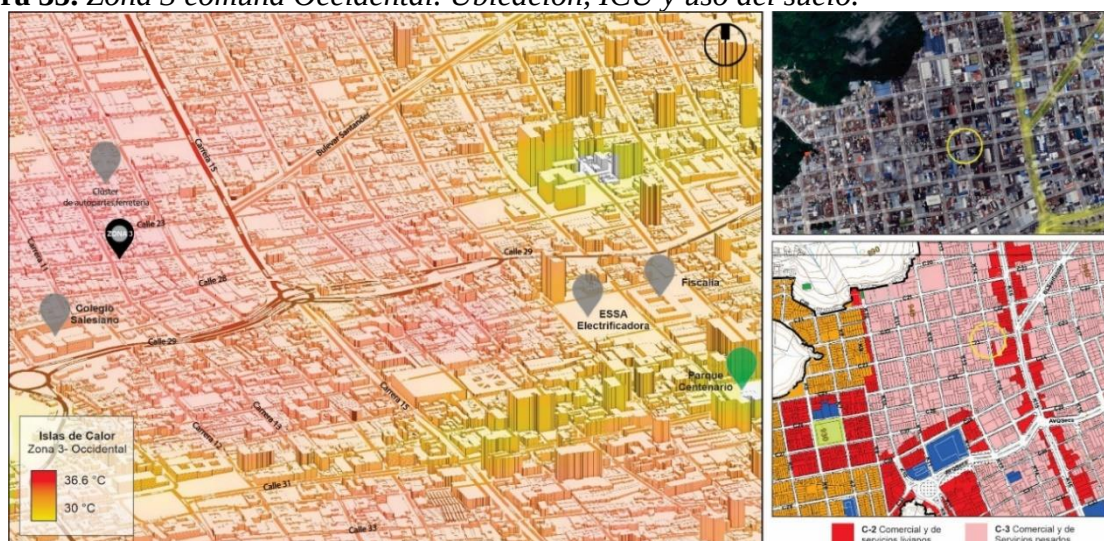
Finalmente, la comuna occidental cuenta con 312.6 habitantes por hectárea y un mínimo de arborización según registro de la Figura 27, de 1 a 3 árboles por hectárea para las zonas 2, 3 y 4 como se ratifica en la Figura 34.

Figura 34. Arborización Vs. ICU para la zona 2, zona 3, zona 4, zona 5 y zona 6



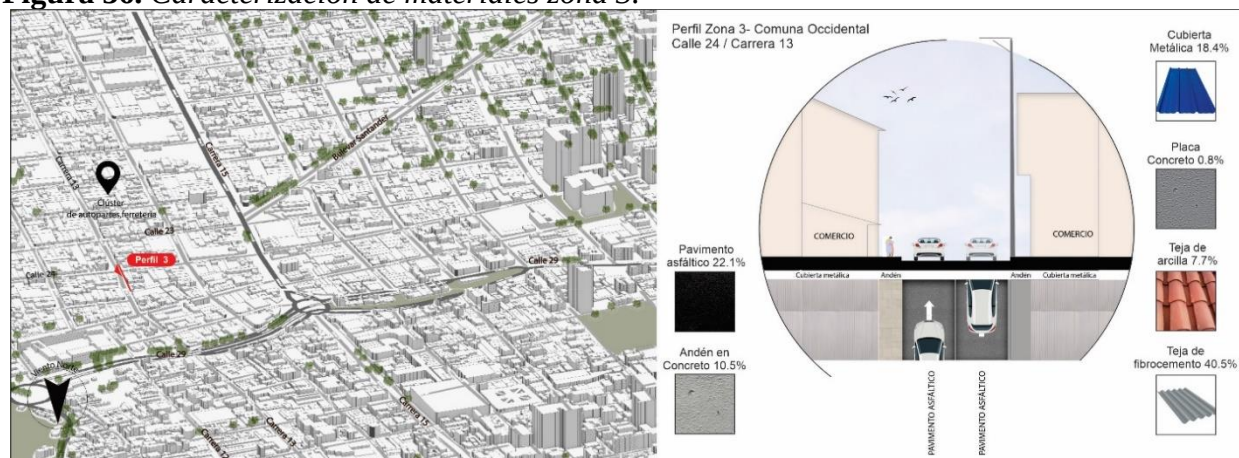
4.3.3 Zona 3 Comuna Occidental

Ubicada en la calle 24 entre carrera 13 y 14 según la **Figura 35**, donde la temperatura alcanzó a registrar valores por encima de los 30 °C llegando a los 36.6 °C. La actividad comercial del sector está dada por servicios pesados de autopartes, ferreterías e industria para maquinados metalmecánicos. Cercano a dos vías principales de la ciudad, la arteria principal de la carrera 15 y la arteria secundaria de la avenida Quebrada Seca, con una altura de 946 msnm.

Figura 35. Zona 3 comuna Occidental. Ubicación, ICU y uso del suelo.

Adaptado de Google Earth y POT (Alcaldía de Bucaramanga, 2021b).

En la Zona de estudio 3 el porcentaje de pavimento asfáltico y concreto en andenes se encuentra en un 32.6 % en relación con las cubiertas en zonas privadas que arrojó un 67.4%. El material predominante en cubiertas es la teja de fibrocemento en un 40.5% y la cubierta en aluminio en un 18.4%.

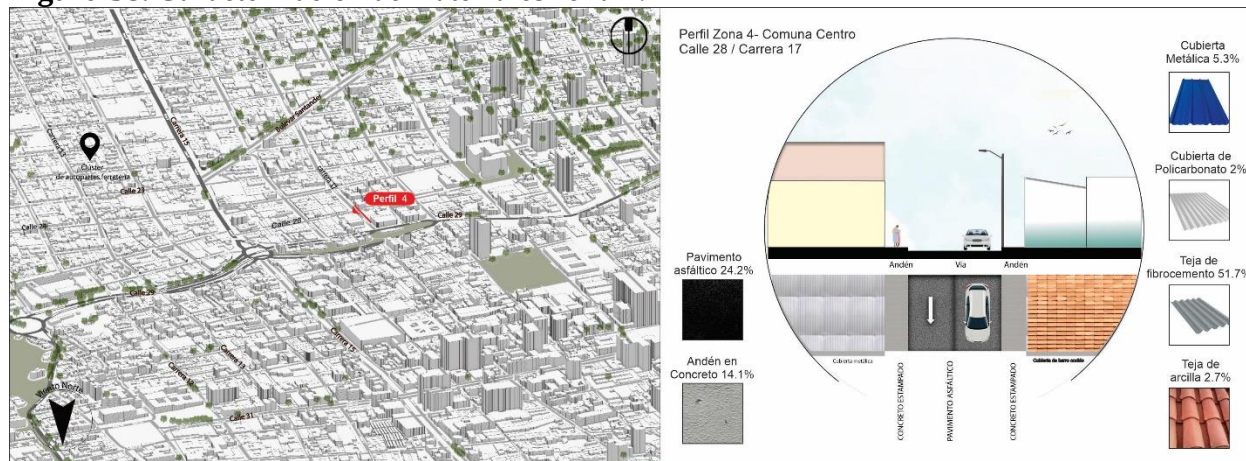
Figura 36. Caracterización de materiales zona 3.

4.3.4 Zona 4 Comuna Centro

Figura 37. Zona 4 comuna Centro. Ubicación, ICU y uso del suelo.



En la Zona 4 sobre la calle 28 con carrera 17, el porcentaje en espacio público entre pavimento asfáltico y andén en concreto se encuentra en un 38.3% por hectárea versus el 61.7% de otros materiales en cubiertas en edificaciones de zonas privadas.

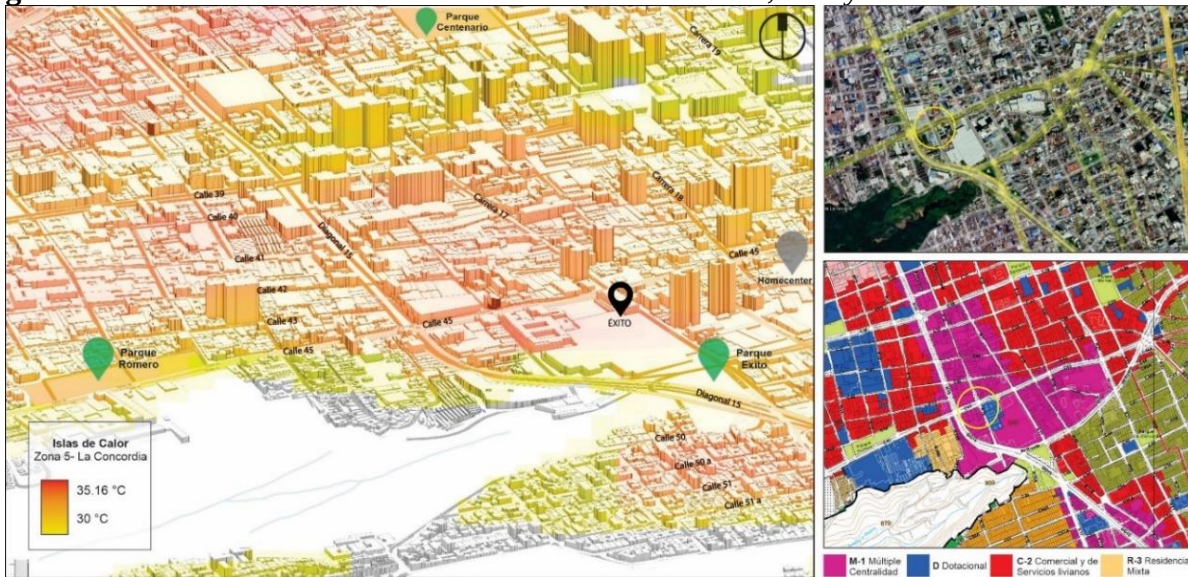
Figura 38. Caracterización de materiales zona 4.

La mayoría de los materiales en cubierta que se aprecian son tejas de fibrocemento, con una vejez evidente y alto grado de suciedad por la exposición al hollín y a la contaminación de la ciudad.

4.3.5 Zona 5 Comuna Centro – La Concordia

La Zona 5 como se aprecia en Figura 39, se encuentra ubicada exactamente sobre la calle 45-arteria secundaria entre la diagonal 15 y la carrera 17 de la ciudad de Bucaramanga, vía que conduce a la zona industrial de Chimitá; es un sector con múltiple centralidad donde se ubica el Éxito de la Rosita, Homecenter y la ferretería Aldía, con una alta circulación vehicular a una altura de 937 metros sobre el nivel del mar. La comuna de la Concordia cuenta con 165.7 habitantes por hectárea.

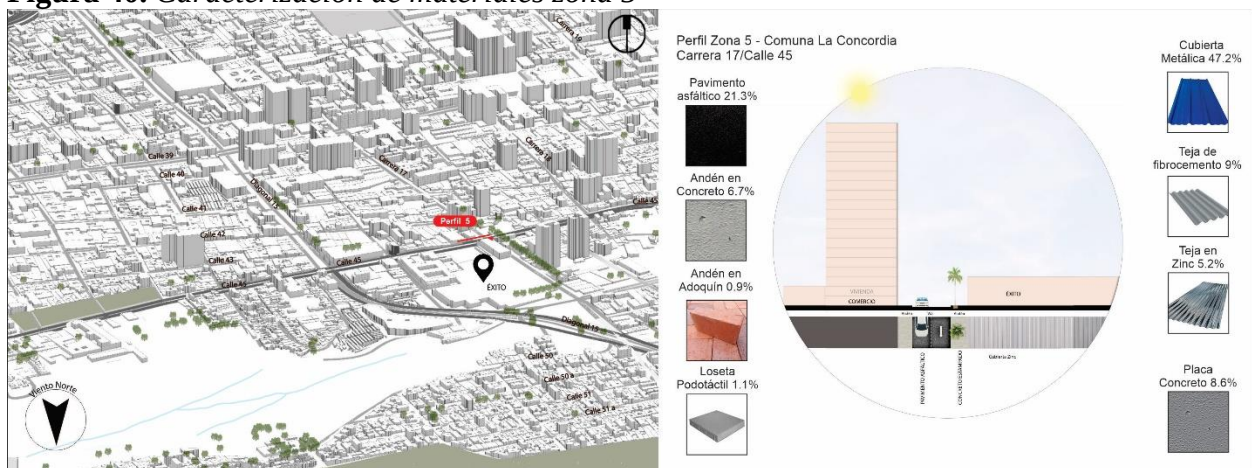
Figura 39. Zona 5 comuna Centro - la Concordia. Ubicación, ICU y uso del suelo



Adaptado de Google Earth y POT (Alcaldía de Bucaramanga, 2021b).

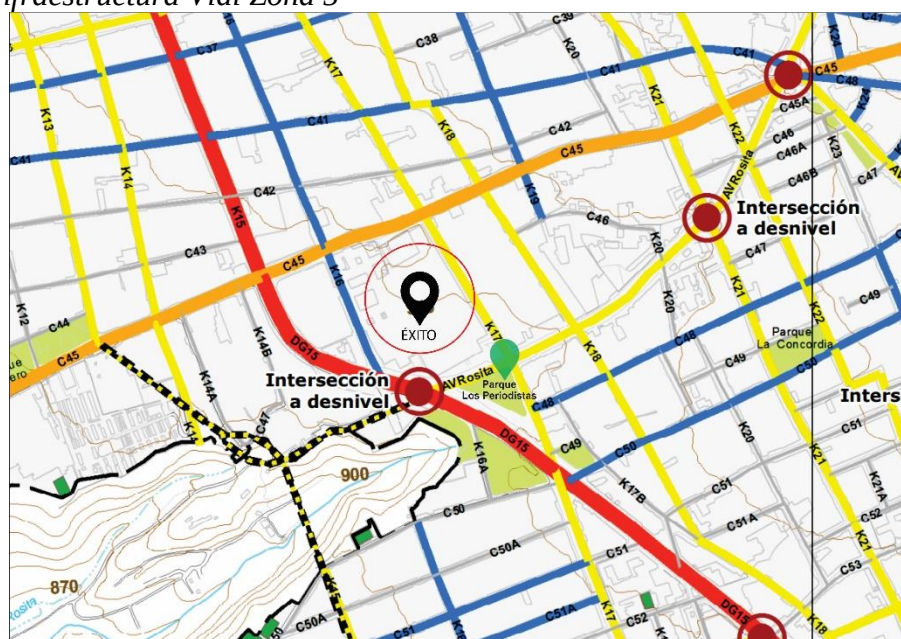
Sobre la zona 5 ubicada en entre la comuna Centro y la Concordia en la carrera17 con calle 45, el porcentaje de pavimento asfáltico, andén en concreto, adoquín en gres y loseta/podotáctil llegan a un 30% versus un 70% de cubierta en su mayoría metálicas, con alto contenido en tejas de aluminio.

Figura 40. Caracterización de materiales zona 5



La arborización en la zona 5 es mayor, gracias a su cercanía a la quebrada la Rosita, al parque de los Periodistas (frente al éxito llamado comúnmente el Parque Éxito) y al Parque de la Concordia; sin embargo, sobre la cubierta del éxito se evidencian altas temperaturas surgen por la materialidad de las cubiertas del lugar y por el alto tráfico vehicular que se da en los intersecciones de la Avenida la Rosita, la diagonal 15 y la Calle 45.

Figura 41. Infraestructura Vial Zona 5

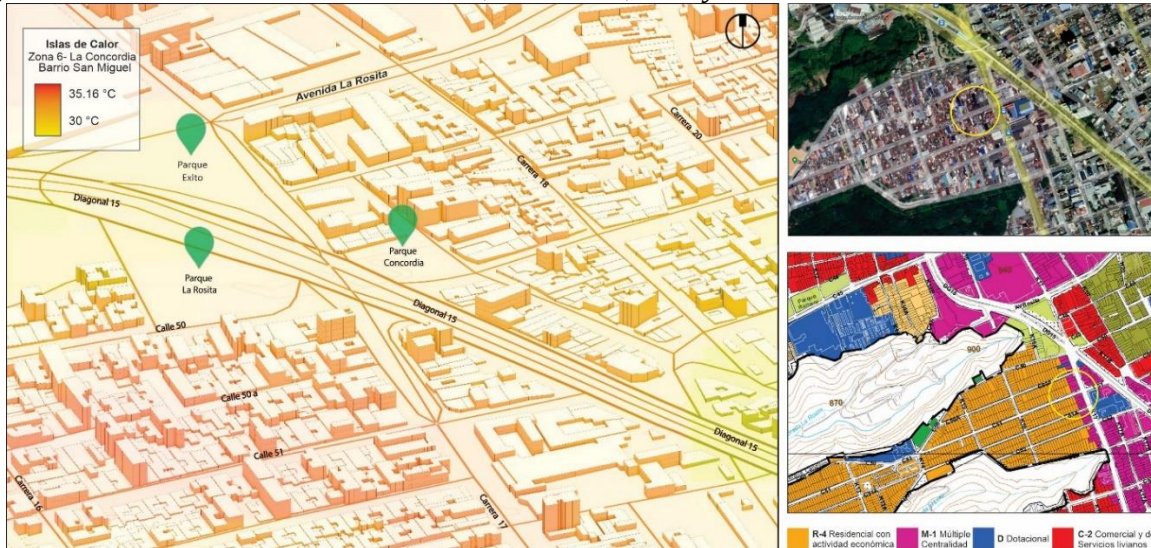


Adaptado de subsistema de infraestructura vial POT 2014-2027 (Alcaldía de Bucaramanga, 2021b).

4.3.6 Zona 6 Comuna La Concordia

El sector se encuentra ubicado entre 2 vías con gran afluencia vehicular como se observa en la Figura 42; la diagonal 15 que conduce al sur de la ciudad y la carrera 17 que conduce a Real de Minas. La zona más afectada por microclimas con altas temperaturas se halla en una zona residencial con actividad económica que se define entre dotacional y comercial de servicios livianos, el barrio San Miguel, donde específicamente se ubica el sector manufacturero del calzado.

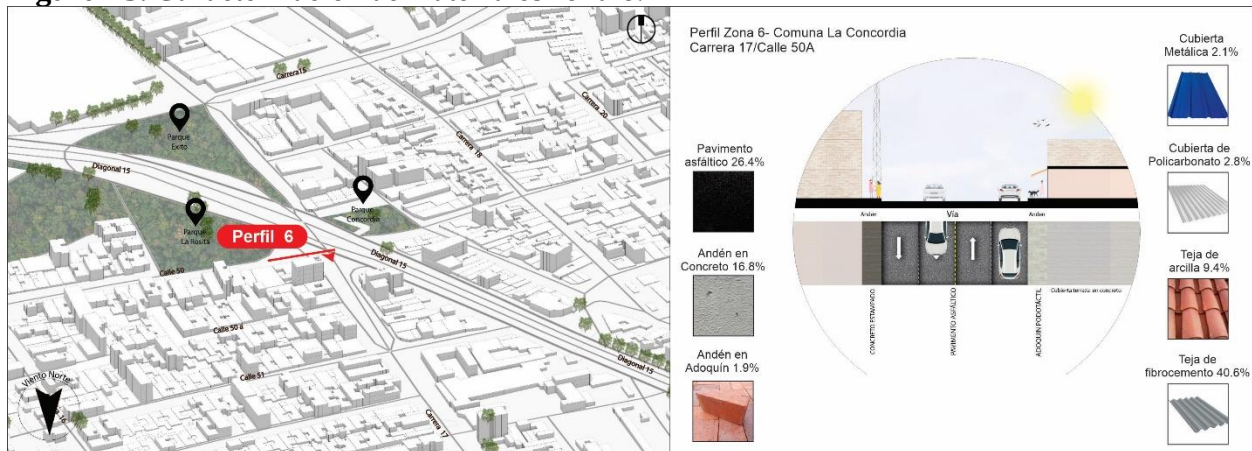
Figura 42. Zona 6 comuna la Concordia, ubicación, ICU y uso del suelo.



Adaptado de Google Earth y POT (Alcaldía de Bucaramanga, 2021b).

En la Zona 6, ubicado en la carrera 17 sobre el depresimido que conduce a la diagonal 15 y a la carrera 17, se presentó una relación de 45.1% y 54.9% materiales de las zonas urbanas entre pavimento y concreto y zonas privadas respectivamente con cubiertas en un alto porcentaje de fibrocemento. Es la zona donde alcanza prácticamente una relación equitativa de las zonas de espacio público y áreas privadas en el barrio San Miguel.

Figura 43. Caracterización de materiales zona 6.



4.3.7 Zona 7 Comuna Sur occidente

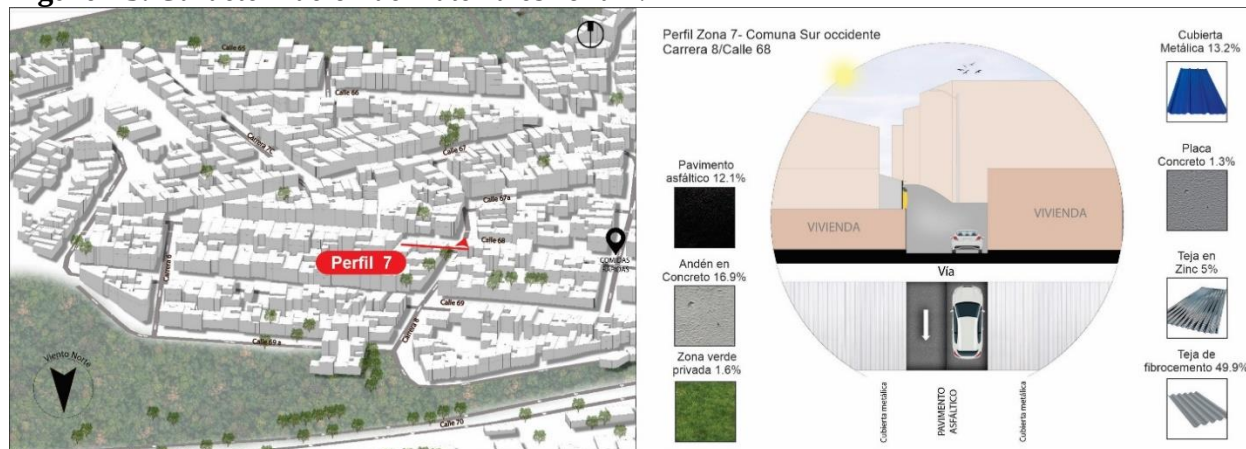
Figura 44. Zona 7 comuna Sur-occidente, ubicación, ICU y uso del suelo.



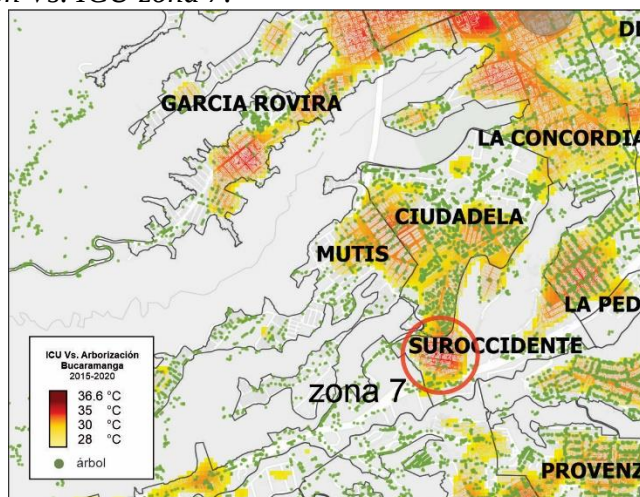
El sector se encuentra ubicado en el barrio Bucaramanga, exactamente en la carrera 8 con calle 67ª, a una altura de 851 msnm. El sector es residencial con actividad económica tipo R-4, sin embargo, alrededor se encuentra una zona comercial de múltiple centralidad, sobre la vía que de Bucaramanga conduce al municipio de Girón. La comuna Occidente cuenta con 197.6 habitantes por hectárea.

Finalmente, en la Zona 7 se percibe sobre la vía un 16.9% de pavimento y andenes en concreto con un 12.1% de pavimento asfáltico, las zonas privadas en cubiertas representan un 71%.

Asimismo, la relación porcentual por hectárea de materiales que se observa en la Figura 45 deja ver una relación promedio de materiales en espacio público y zonas privadas del 33.4% y 66.6% respectivamente, dónde el pavimento asfáltico en la mayoría de los casos es el protagonista en las zonas de espacio público y la teja de fibrocemento es el porcentaje más alto en las cubiertas de zonas privadas.

Figura 45. Caracterización de materiales zona 7.

La arborización en la zona 7 por hectárea es de 1 a 3 árboles, es por ello que la gran afectación de microclimas en esta zona se deba a su alto porcentaje de zonas duras, así como la ubicación aledaña a la arteria primaria que se deriva de la carrera 27 a la Autopista Vía a Girón.

Figura 46. Arborización Vs. ICU zona 7.

En resumen, la materialidad de las zonas afectadas por ICU se relaciona en la Figura 47, donde se desglosan las zonas privadas de las áreas de espacio público que evidencia un alto porcentaje de pavimento, concreto y cubiertas por lo general de fibrocemento.

Figura 47. Caracterización de materiales por zonas.

Material (%)	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7
Pavimento asfáltico	25.2	20.7	22.1	24.2	21.3	26.4	12.1
Andén en concreto	2.1	9.7	10.5	14.1	6.7	16.8	16.9
Adoquín en grés		1.3			0.9	1.9	
Loseta podotáctil					1.1		
33.4 Total Espacio público (%)	27.3	31.7	32.6	38.3	30.0	45.1	29.0
Cubierta de aluminio	3.5	10	18.4	5.3	47.2	2.1	
Teja de arcilla	2.4	11.8	7.7	2.7		9.4	13.2
Teja de fibrocemento	65.6	31.7	40.5	51.7	9	40.6	49.9
Placa de concreto	1.2	8.9	0.8				1.3
Teja de zinc		5.9			5.2	2.8	5
Cubierta en policarbonato				2			
Zona Verde privada							1.6
Piso parqueo en concreto					8.6		
66.6 Total zonas privadas (%)	72.7	68.3	67.4	61.7	70.0	54.9	71.0

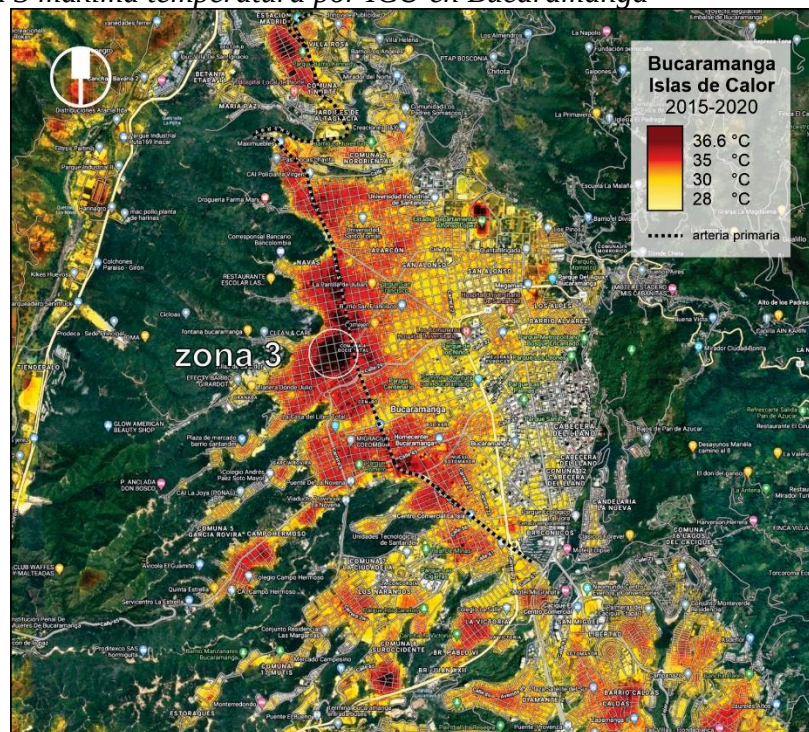
Fue importante para llevar a cabo el análisis preciso de materiales de la zona más afectada la revisión de las variables correspondientes al calor antropogénico producto de las actividades del ser humano en el territorio – Uso del Suelo y el porcentaje de arborización con su NVDI, que permitió determinar 2 zonas críticas, con una relación de máximas temperaturas, según se registra en la Tabla 12 en rojo.

Tabla 12. Análisis de zonas por uso del suelo, habitantes y árboles por hectárea

Zona	Comuna	Actividad/uso del suelo	Habitante por hectárea	Árbol por hectárea
1	Comuna 1: Norte	R-4 C-2	140.5	1-3
2	Comuna 4: Occidental	C-2 C-3	312.6	1-3
3	Comuna 4: Occidental	C-2 C-3	312.6	1-3
4	Comuna 15: Centro	C-3	94.5	1-3
5	Comuna 6: Centro- La Concordia	M-1 D	165.7	6-9
6	Comuna 6: La Concordia	M-1 R-4	165.7	6-9
7	Comuna 8: Suroccidente	R-4	197.6	1-3

En la revisión se llegó a la conclusión que las zonas con mayor afectación por ICU desde las variables antropogénicas con poca arborización son la zona 2 y 3. De dónde la zona 3 presenta una máxima temperatura de 36.6 °C según la Figura 48.

Figura 48. Zona 3 máxima temperatura por ICU en Bucaramanga



Nota: En el Apéndice K. *Análisis Zona 3: máxima afectación por ICU* se detalla el análisis realizado a la zona 3 que sirvió de soporte al desarrollo del objetivo.

Para la selección de un material que contribuya a mitigar los efectos de las ICU es pertinente valorar los materiales de construcción desde sus propiedades térmicas y exponer las características relevantes para la selección.

4.4 Propiedades térmicas de los materiales de construcción

Según Neila González (2004) los materiales tienen características de absorción, reflexión y transmisión, dada por 3 mecanismos que trabajan de manera conjunta o independiente así: *conducción, convección y radiación*, de dónde se relacionan otras características que deben valorarse en el momento de estudiar y definir un material para un territorio.

Es así que las propiedades ópticas en los materiales, el albedo de las mismas y la radiación reflejada, absorbida y transmitida son las principales al momento de seleccionar un material de construcción. Por ello es prioritario definir las características opto térmicas que se relacionan con las ICU, a partir de las cuales se valoran los materiales para la adaptación al territorio.

Tabla 13. *Propiedades opto-térmicas de los materiales de construcción*

Expresión	Propiedades Opto-térmicas de los materiales	Definición	Unidad	Valores / Fórmulas
	Radiación	"La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a temperatura finita" (Incropera y Dewitt, 1999)	W/m²	
q_k	Transferencia de Calor por radiación	"Transferencia de energía por ondas electromagnéticas" (Incropera y Dewitt, 1999)	hr(W/m ² .K)	$q_r = A\epsilon\sigma (T_s^4 - T_{alred}^4)$ q _r : transferencia de calor por radiación A: área de transferencia de calor σ: constante de Stefan T: temperatura ε: emisividad $0 \leq \epsilon \leq 1$
	Ley de Stefan-Boltzmann	"Evalúa la cantidad que emite un cuerpo por radiación" (Neila González, 2004)	W/m ² .°C	$q_r/A = \epsilon \sigma T^4$
	Ley de Wien	"Para la radiación de un cuerpo negro la longitud de onda de máxima emisión es inversamente proporcional a la temperatura absoluta" (Conesa, 2013)		$\lambda_{m\acute{a}x} \cdot T = 2898 \mu m.k$
σ	Constante de Stefan	Relacionada a la teoría de la radiación térmica dónde la intensidad radiada absoluta aumenta directamente proporcional a la temperatura	W/m ² K ⁴	$5.67 \times 10^{-8} W.m^{-2} K^{-4}$

Expresión	Propiedades Opto-térmicas de los materiales	Definición	Unidad	Valores / Fórmulas
hr	Coeficiente de radiación	"Es la diferencia del calor emitido por un cuerpo B a temperatura Tb y el calor de un cuerpo A a temperatura Ta" (Conesa, 2013)	W/m ² °C	
Ii	Irradiancia incidente		W/m ²	
c	Constante de onda al vacío		km/s	c = 299792 km/s
λ	Longitud de onda (larga o corta)		μm	h = 6.63 x 10 ⁻³⁴ Js
SRI	Índice de reflexión solar -SRI	El índice de reflexión solar a partir de la Ley de Stefan se representa en porcentaje y contempla la temperatura superficial de patrón negro (Tb) en °C o K menos la temperatura superficial sobre la diferencia d temperatura de patrón negro y patrón blanco (Tw).	%	SRI = 100 (Tb-Ts)/(Tb-Tw)
â	Reflexión Solar-Reflectancia solar - albedo	"Es la fracción del flujo solar reflejada por una superficie" (Alchapar, 2019)	nm	
	Color del material			
α	Absortancia solar	"Es la fracción del flujo solar absorbida por una superficie" (Alchapar, 2019)		
	Textura del material			
	Acabado de superficie del material			
ε	Emisividad térmica (emitancia)	Es la proporción de flujo radiante emitido por una superficie a una temperatura dada, en relación con la emitida por un radiador de un cuerpo negro a la misma temperatura	Wm	0 < ε < 1
	Conducción	"Es la transmisión de calor entre dos partes con diferentes temperaturas" (Conesa, 2013)	W/m°C	
qk	Transferencia de Calor por conducción	"Difusión de energía debido al movimiento molecular aleatorio" (Incropera y Dewitt, 1999)	k(W/m.K)	qk = -kA (∂T/∂x) qk : razón de flujo de calor A : área de transferencia de calor k : conductividad térmica T : temperatura local x : distancia en la dirección del flujo de calor
	Ley de Fourier	"Regula la transmisión de calor por conducción en un medio sólido isótropo" (Neila González, 2004)		φ/A = λ (∂T/∂x)

Expresión	Propiedades Ópto-térmicas de los materiales	Definición	Unidad	Valores / Fórmulas
k ó λ	Conductividad térmica	"Es la medida de la rapidez a la que se transmite calor en un material" (Askeland y Wright, 2017)	(W/mK) ó (W/m°C)	
ρ	Densidad		Kg/m ³	
	Coeficiente de conductividad térmica		N/A	$\phi = -\lambda \text{ grad T}$
a	Difusividad térmica	Encargada de medir la velocidad de calentamiento (Neila González, 2004)	m ² /s	$a = \lambda / \rho C_p$
b	Efusividad térmica	"Capacidad efectiva que ofrecen los materiales para acumular calor" (Neila González, 2004)	(S1/2*W/ m ² °C)	$b = (\lambda / \rho C_p)^{1/2}$
R	Resistencia Térmica		m ² K/W	$R = d / \lambda$
U	Transmitancia térmica (coeficiente de transmisión de calor)	Es el flujo de calor que se conduce a través de un elemento constructivo, desde el exterior al interior	(W/m ² K) ó (W/m ² °C)	$U = 1/R$
I	Inercia Térmica	"La dificultad que ofrece un cuerpo a cambiar su temperatura" (Neila González, 2004)	J/m ² .s ^{1/2} .° C	$I = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C_p}$
mt	Masa térmica	Está dada en relación directa del volumen, la densidad y el calor específico de un material	kJ / m ³ . °C	$mt = V \cdot \rho \cdot C_p$
Ts	Temperatura Superficial		°C o K	
Cp	Calor específico	"Es la cantidad de energía necesaria para incrementar un grado la temperatura de una cantidad de material" (Askeland y Wright, 2017)	(cal/g*K) ó (J/Kg°C)	
	Convección	"Es la transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia" (Conesa, 2013)	W/m ² .°C	
qc	Transferencia de Calor por convección	"Difusión de energía debido al movimiento molecular aleatorio más transferencia de energía debido al movimiento global (advección)" (Incropera y Dewitt, 1999)	hc (W/m ² .K)	$qc = Ahc\Delta T$ qc: tasa de transferencia de calor por convección A: área de transferencia de calor hc: coeficiente de transferencia de calor promedio por convección a través de área ΔT: diferencia entre la Temperatura superficial Ts y una temperatura del

Expresión	Propiedades Opto-térmicas de los materiales	Definición	Unidad	Valores / Fórmulas
				fluido T en un lugar específico
	Ley de Planck	Relacionada con la intensidad de radiación que emite un cuerpo negro con temperatura T y frecuencia	(W/m ² °C)	$E = hc/\lambda$ h: constante de Planck
	Ley de enfriamiento de Newton	"Indica el flujo de calor que se transfiere por convección a través de la unidad de superficie" (Neila González, 2004)	(W/m ² °C)	$\phi_{cv}/A = hc \cdot \Delta T$
h	Constante de Planck		(W/m ² °C)	
hc	Coeficiente de Convección		(W/m ² °C)	$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$
hm	Coeficiente de transferencia de masa por convección		m/s	
	Admitancia	"Es la característica que presenta una superficie de recibir calor del aire o suministrar calor hacia el aire" (Evans y de Schiller, 1991)	W/m ² °C	

Las propiedades relevantes en la selección de materiales de superficies horizontales se relacionan con el acabado superficial, el color, la textura que aportan significativamente desde el índice de reflexión solar (ISR) - (reflexión directa e indirecta de la radiación (SR) y la emisividad al infrarrojo que tiene un material), en relación con la emisión de la energía radiativa absorbida y emitida; así, a mayor energía reflejada menor temperatura. De tal forma que materiales de acabado de superficie horizontales con albedo alto pueden disminuir la temperatura de un espacio urbano entre 2 y 4 °C para climas calientes según Taha (2000).

El color del material, específicamente del pavimento y aceras impacta de manera positiva en la reducción de las temperaturas superficiales, mitigando las ICU. Colores como el blanco, beige y amarillo tienen un mejor comportamiento en el porcentaje de reflectancia solar que el verde, rojo y por último el negro (S (Wan, Hien, Ping, & Aloysius, 2012) (Wan, Hien, Ping, & Aloysius, 2012) ynnefa, et ál., 2011).

Los materiales deben ser analizados en la mitigación de las ICU desde su vida útil también, ya que la degradación del material, debido al deterioro por los contaminantes del ambiente, la humedad, la cristalización debido a los rayos UV, ocasionan una reducción en la reflectancia solar, así como la falta de mantenimiento por suciedad también aumenta la SR, que se dan desde algas, cianobacteria y cenizas, hollín e hidrocarburos (Berdahl, et ál., 2008).

A partir de la valoración de las propiedades opto-térmicas de los materiales y su impacto en la generación de ICU sobre las 7 zonas de Bucaramanga, fue conveniente la revisión de materiales de fácil acceso en la región que cumplieren con los requerimientos de baja absorción térmica, desde la valoración de materiales horizontales en 3 categorías así: pavimentos, andenes y cubiertas.

Figura 49. *Categoría 1: materiales en pavimentos.*

Categoría 1. Materiales en Pavimentos	Conductividad Térmica λ	Densidad ρ	Calor específico C_p	Emisividad ε	Albedo $\hat{\alpha}$	Absortancia α	SRI	Fuente	Cálculo SRI
	(W/m ² K)	Kg/m ³	J/Kg. K	Wm	nm	$\alpha = 1 - \hat{\alpha}$	%		
Pavimento asfáltico	0.7-1	2100-2115	920-1000	0.93	0.09-0.2	0.82-0.95	20	(ICCL,2007)	Calculadora (Levinson, 2004)
Pavimento en concreto	2.3	2300	1000	0.93	0.4	0.85	46	(Neila, 2004)	Calculadora (Levinson, 2004)

La selección de materiales en espacio público como pavimentos y andenes debe contribuir a la mitigación de las ICU, preservando la normatividad vigente de resistencia acorde a la metodología ASSHTO-93, los manuales de diseño de pavimentos de INVIAS, la NTC, la norma NSR-2010 así como el Manual para el diseño y construcción del espacio público de Bucaramanga, abordando los requerimientos de seguridad, accesibilidad, calidad, sostenibilidad y economía.

Dentro de las tablas 50 y 51 los datos del índice de reflectancia solar fueron obtenidos con la calculadora de SRI en Excel de Levinson (2004). Los datos en rojo fueron obtenidos de una sola fuente, sin poder corroborar dicha información.

Figura 50. *Categoría 2: materiales en andenes.*

Categoría 2. Materiales en Andenes	Conductividad Térmica λ (W/m ² K)	Densidad ρ Kg/m ³	Calor específico Cp J/Kg. K	Emisividad ε Wm	Albedo $\hat{a}$ nm	Absortancia a $a = 1 - \hat{a}$	SRI %	Fuente	Cálculo SRI
Bloque de Adobe	0.5-0.95	1770-2000	1149.94	0.91	0.33	0.67	36	(ICCL,2007) (Neila, 2004)(Chávez, 2009)	
Ladrillo macizo LM	0.85	2300	1000	0.85	0.33	0.67	34	(ICCL,2007) (Neila, 2004)	Calculadora (Levinson, 2004)
Ladrillo rojo	0.91	1595.12	1073.8	0.93	0.33	0.67	37	(Chávez, 2009)	Calculadora (Levinson, 2004)
Baldosa cementicio-pétreo recto cuadrado gris multicolor				0.9	0.19-0.25	0.8	25-39.66	(Alchapar N. C., 2011)	Calculadora (Levinson, 2004)
Baldosa cementicio-pétreo liso mosaico gris pulido	1.4	2100	1	0.9	0.22	0.78	50	(Alchapar N. C., 2011)	Calculadora (Levinson, 2004)
Baldosa cementicio-calcárea recto amarillo pulido				0.9	0.16	0.84	34.72	(Alchapar N. C., 2011)	Calculadora (Levinson, 2004)
Baldosa cementicio-calcárea recto amarillo pulido podotáctil				0.9	0.17	0.83	34.94	(Alchapar N. C., 2011)	Calculadora (Levinson, 2004)
Caucho celular	0.06	60-80	1500	0.89	0.32	0.68	34	(ICCL,2007)	
Hormigón armado	2.3	2300	1000	0.93	0.4	0.85	46	(ICCL,2007)	Calculadora (Levinson, 2004)
Hormigón con árido ligeros	1.15	1600-1800	1000	0.93	0.4		46	(ICCL,2007)	
Concreto (arena, grava y piedra)	1.4-2.9	2400	800-1000	0.9	0.25	0.7	25	(Neila, 2004)	Calculadora (Levinson, 2004)
Concreto (arena, grava y piedra)	1.0-1.9	2080	800-1000	0.9	0.25	0.7	25	(Neila, 2004)	Calculadora (Levinson, 2004)
Concreto (arena, grava y piedra)	1.3-2.6	2240	800-1000	0.9	0.25	0.7	25	(Neila, 2004)	Calculadora (Levinson, 2004)

La revisión de senderos peatonales (andenes) en las zonas más afectadas, la zona 3 (Figura 47) demuestra que el uso actual del concreto *in situ* no es recomendable debido a su albedo del 0.25 como se aprecia en la Figura 50.

Figura 51. Categoría 3: materiales en cubiertas.

Categoría 3. Materiales en Cubiertas	Conductividad Térmica λ	Densidad ρ	Calor específico C_p	Emisividad ε	Albedo $\hat{a}$	Absortancia α	SRI	Fuente	Cálculo SRI
	(W/m ² K)	Kg/m ³	J/Kg. K	Wm	nm	$\alpha = 1 - \hat{a}$	%		
Teja máster 1000 - blanca					0.72	0.28	85	(Acesco,s.f.)	
Teja máster 1000 - azul				0.75	0.3	0.7	25	(Acesco,s.f.)	
Teja máster 1000 - gris glacial							50	(Acesco,s.f.)	
Teja de policarbonato	0.2 c	1200	1200					(Neila, 2004)	
Teja colonial de arcilla cocida	1	2000	800	0.9	0.31-0.33	0.65	36-58.99	(Alchapar N. C., 2011)	Calculadora (Levinson, 2004)
Teja de fibrocemento	0.36-0.96	2000	1250 c	0.93-0.96	0.2-0.3	0.83	20	(Calderon Uribe, 2019)	Calculadora (Levinson, 2004)
Cloruro de polivinilo (PVC)	0.17	1390	900					(ICCL,2007)	
Policarbonato (PC)	0.2	1200	1200					(ICCL,2007)	
Polimetilmetacrilato (PMMA)	0.18	1180	1500					(ICCL,2007)	
Aluminio - Teja de aluminio	230	2700	880	0.05-0.25	0.61-0.9	0.2	56	(ICCL,2007)	Calculadora (Levinson, 2004)
Teja de Zinc	106-140	7200	380		0.21	0.79		(ICCL,2007), (Calderon Uribe, 2019)	
Recubrimiento manto asfáltico				0.96	0.1	0.9		(Neila, 2004)	Calculadora (Levinson, 2004)
Acero Galvanizado				0.28	0.65	0.35	58	(ICCL,2007)	Calculadora (Levinson, 2004)
Teja Ecowall 27 (Arkos) estructura UPVC y alma en PVC	0.06			0.94			82	(Arkos, 2017)	
Teja Ecoroof 37 (Arkos)	0.06						82	(Arkos, 2017)	
Teja Ecoroof 40 (Arkos)	0.06						82	(Arkos, 2017)	
Teja Palruf 50 (Arkos)	0.16						91	(Arkos, 2017)	
Teja española residencial (Arkos)	0.13						60	(Arkos, 2017)	

De la Figura 49, la Figura 50 y la Figura 51 se evidencian materiales con un porcentaje alto del Índice de Reflexión Solar – (ISR o por sus siglas en inglés SRI-*solar reflectance index*) con relación directa del color, el acabado superficial y la composición del suelo para cada una de las categorías (pavimentos, andenes y cubiertas).

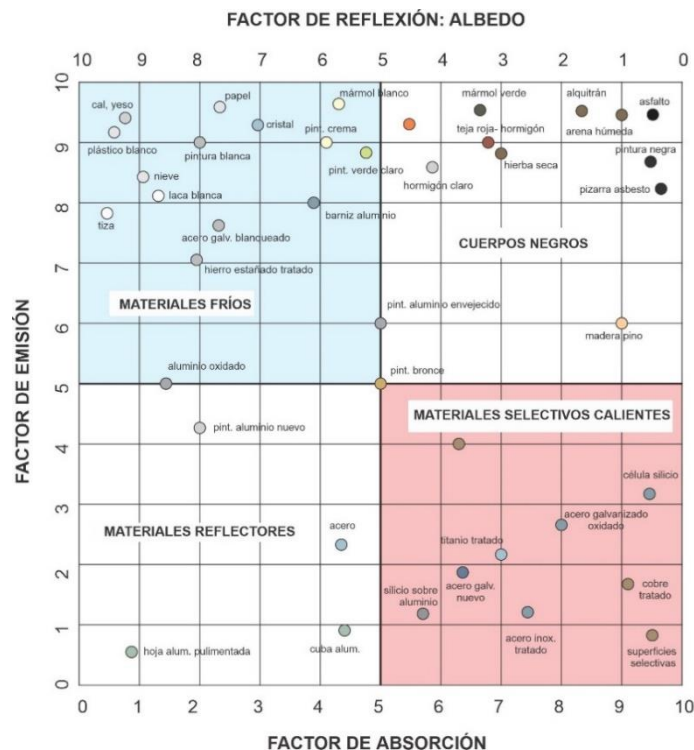
Figura 52. Imágenes infrarrojas térmicas

Nota: las imágenes infrarrojas muestran la radiación de onda corta absorbida por las superficies, siendo mayor en superficies oscuras para el pavimento asfáltico (imagen izquierda y centro). En la imagen derecha se observa en amarillo la menor absorción térmica de las superficies claras. Fuente: imagen izquierda tomada de (Berkeley Lab, 2022). Imagen derecha tomada de (Alchapar, et ál., 2012).

La selección de materiales para superficies horizontales debe hacerse con materiales fríos de baja inercia térmica que son los encargados de absorber y liberar menor temperatura, contando por ello con un albedo e índice de reflexión mayor. Dichos materiales fríos se relacionan con colores claros con alta reflectancia solar y alta emisividad infrarroja como se observa en la Figura 53.

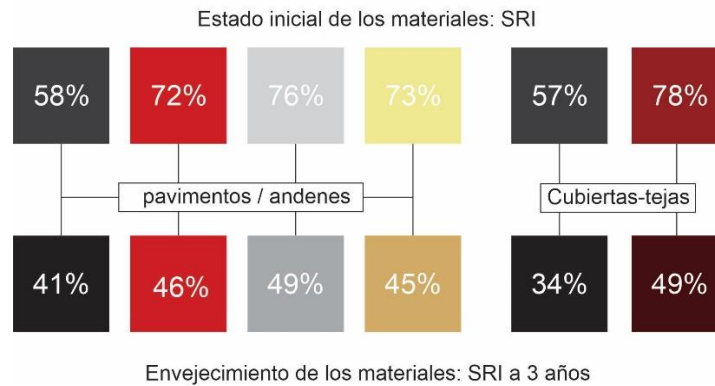
Cabe resaltar que la inercia térmica en los materiales está estrechamente ligada a la densidad, el calor específico y la conductividad térmica del material; expresado según Cuitiño Rosales M. G. (2020) como la capacidad de los materiales de absorber, acumular calor y liberarlo en un tiempo; llegando a ser una fortaleza para climas fríos y un punto a valorar en climas templados cálidos por la generación de ICU en periodos nocturnos, o posteriores a las horas de brillo solar máximo diurno.

Figura 53. Valores de absorptancia y emitancia superficial.



Adaptado de Martín Monroy (1995).

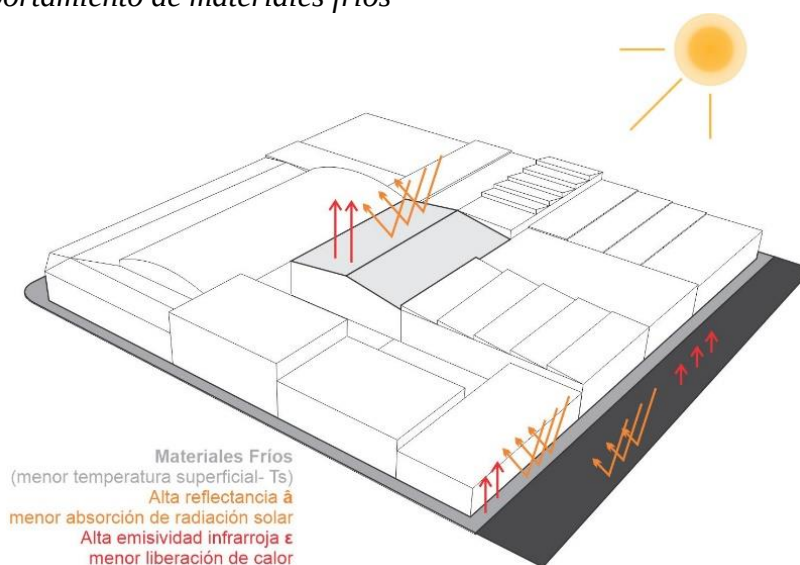
Figura 54. SRI de Superficies Horizontales en 3 categorías: pavimentos, andenes y cubiertas.



Adaptado de Alchapar, et ál. (2012).

Para la categoría de pavimentos se recomienda en Bucaramanga superficies asfálticas en concreto o el uso de recubrimientos, como el patentado por la empresa *Nippo Corporation* que es una capa que se aplica sobre el asfalto, de color oscuro para evitar deslumbramiento en las vías, más un pigmento extremadamente reflexivo a ondas infrarrojas y pequeñas partículas cerámicas huecas que reducen la conducción térmica y el sobrecalentamiento en la pintura (Wan, et ál., 2012).

Figura 55. Comportamiento de materiales fríos



Adaptado de Alchapar, et ál. (2012).

Para la categoría de andenes – senderos peatonales lo recomendable es el uso de losetas de concreto lisa (base cementicia pétrea) gris pulida que posee un SRI del 50%, fabricadas en color gris claro o blanco por diferentes empresas en el país como Kreato S.A.S., Metroblock, Dipreco prefabricados, pisos ALFA; asimismo, es pertinente el incremento de coberturas vegetales y de siembra de árboles sobre las zonas más afectadas – zonas 2 y 3 de Bucaramanga; que permitan evapotranspiración, mayor escorrentía como estrategia complementaria para la mitigación de las ICU en hasta 2 °C (Ver Tabla 11. *Estrategias y resultados de publicaciones*).

Para la categoría de cubiertas se recomienda como se percibe en la Figura 51, el uso de la línea de cubiertas de UPVC con alma de PVC que maneja la empresa ARKOS; o el uso de recubrimientos claros lisos o satinados que permita el mantenimiento de la superficie. ACESCO actualmente maneja la línea de cubiertas METALUM (composición: aleación de Aluminio 55%, Zinc 43.5% y 1.5% de Silicio) con acabados en colores de alto SRI.

En el caso de recubrimientos para cubiertas, PINTUCO maneja como impermeabilizante el Pintuco *Fill 12* de rápido secado, una pintura acrílica con un Índice de Reflectancia solar de 94%. De igual manera la empresa SIKA maneja las membranas blancas termoplásticas LAM, Sikaplan Fastened-45 *Feltback Energy Smart*, Sarnafi S327-15L *white*, que tienen un SRI que oscila entre el 88 y el 107% respaldado por la certificación LEED *Green Building* bajo la normativa *Cool Roof Rating Council* – CRRC. Asimismo, línea de impermeabilizantes acrílico – poliuretano base agua como el SikaFill-300 *Thermic* y el Sikalastic-560.

Finalmente, a partir del uso eficiente de materiales y coberturas verdes que propicien reducción de las ICU en Bucaramanga se podrá disminuir el uso de equipos acondicionados (que

generan costes altos de energía) y se aumentará la evapotranspiración natural que dará una mejor sensación térmica del espacio propiciando entornos sociales de bienestar.

5. Conclusiones

- Se identificaron siete zonas con mayor afectación de ICU, llegando a temperaturas de hasta 36.6 °C, entre las 15:05 y las 15:12 registradas desde imágenes satelitales Landsat 8 (mesoescala). En el geoprocesamiento se ubicaron las 7 zonas en las comunas Norte, Occidental, Centro, La Concordia y Sur occidente de Bucaramanga. La gran afectación por microclimas se origina en su mayoría sobre la arteria principal de la ciudad, la carrera 15, y se enfoca con gran intensidad en las manzanas ubicadas entre las calles 23 y 24 intersectadas con carreras 13,14 y 15. Dentro de los análisis meteorológicos de Bucaramanga se puede definir un clima templado semiárido con máximas temperaturas para el periodo comprendido entre el 2015 y 2020 con máximo brillo solar entre las 11:09 y las 13:04, una radiación media anual máxima en el mes de febrero con 847.18 Wh/m². Para el mes de febrero se concluye igualmente la menor humedad relativa (69.79%) resultado de las altas radiaciones originadas por la cercanía del sol a la tierra (perihelio).
- Las propiedades relevantes para el estudio de materiales en construcción a fin de mitigar las ICU, se debe centrar en las propiedades térmicas de Radiación de los materiales, exclusivamente en la reflexión o emitancia térmica desde su rango de albedo y la absorptancia térmica que se relaciona directamente con la inercia térmica y propagación de calor en un espacio de tiempo. Finalmente, las estrategias recomendadas desde literatura con revisión de 40 publicaciones son las siguientes: arborización de andenes, cubiertas verdes en edificaciones, cambio de materiales en vías, de pavimento asfáltico a pavimento

permeable y materiales en edificaciones y senderos peatonales con albedo aproximado de 1 permitiendo así el aumento en la reflexión de las superficies y la disminución de las ICU.

- Desde la detección de las zonas con mayor afectación ICU en Bucaramanga y la revisión sistemática de literatura enfocada en materiales con propiedades opto-térmicas se determina que los materiales propicios para el uso en superficies horizontales deben cumplir con características físicas de acabado liso, color claro o blanco y composición interna porosa para reflejar la radiación solar que incide en ellas y liberar la radiación absorbida (con emisión infrarroja alta); por lo tanto para senderos peatonales en la ciudad de Bucaramanga se recomienda el uso de losetas en concreto con acabado liso gris claro o blanco que absorben menor radiación comparada con los concretos in situ de acabado ranurado o textura de barrido.

Finalmente la hipótesis en las que se sustentó el presente trabajo, correlacionó los datos de estaciones meteorológicas, con las tomas a mesoescala a partir de imágenes satelitales Landsat 8 donde corroboró que las zonas con mayor afectación por ICU, fueron la comuna Occidental y Centro (zonas centrales de la ciudad), producto de la intensidad de uso, los materiales de construcción, el alto tráfico de peatones y vehículos, rodeados de suelos endurecidos; confirmando que en cuanto a materialidad el aspecto físico y morfológico, referente al acabado, color y composición del material contrarresta los efectos de las Islas de Calor Urbana, sumado a estrategias urbanas de senderos permeables con mayor arborización y capa vegetal.

Con respecto al desarrollo del trabajo y la comprensión desde el Diseño Industrial; fue interesante reconocer desde el todo, la importancia de los elementos en el espacio urbano, entendiendo el todo como ese espacio donde el ser humano desarrolla su vida y cotidianidad, el territorio donde se entreteje una cultura y se da el reconocimiento del uno en el otro, viéndose

afectado ese interactuar por condiciones externas climatológicas producto del crecimiento mismo de la ciudad. Fue importante comprender igualmente, desde el diseño objetual la relevancia de los materiales en el todo, y las propiedades opto-térmicas que inciden en el confort de las ciudades.

Concluyendo, es de resaltar que los conocimientos adquiridos en la maestría, desde el estudio urbano, su desarrollo, las variables que intervienen en su diseño, el estudio solar y las estrategias bioclimáticas para el diseño de espacios confortables para el ser humano; fundamentaron el estudio actual y amplificaron el panorama de la arquitectura desde la postura objetual y material del diseño industrial.

6. Recomendaciones

Para estudios posteriores se recomienda un análisis a microescala sobre las zonas más afectadas por ICU en Bucaramanga, a fin de definir desde la actividad comercial otro indicador de sobrecalentamiento, como altos hornos para procesados de materias primas y *chiller* de enfriamiento para las diferentes fábricas localizadas en la zona 2, 3 y 4.

Se insta a los diseñadores y arquitectos a trabajar en el desarrollo de materiales de superficies para andenes, que ofrezcan propiedades de resistencia a la compresión bajo las normas vigentes, logrando la adherencia requerida con propiedades de albedo, alto porcentaje de reflexión solar (SRI) y baja absorción radiativa, desde sus propiedades físicas de color y textura; en procura de una baja conductividad térmica que permita el confort no sólo en áreas urbanas sino al interior de edificaciones y viviendas.

A lo anterior se debe agregar que, en cualquier caso, los materiales que se desarrollen deben acogerse a los planteamientos del Consejo Colombiano de Construcción Sostenible CCCS, que es una organización privada sin ánimo de lucro, adscrita al Consejo Mundial de la Construcción

Verde (WGBC por sus siglas en inglés), que tiene como propósito elevar el nivel de sostenibilidad de todos los usos de las edificaciones nuevas y existentes, y de las ciudades en general (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2021). Igualmente para mitigar las ICU deben ir en procura del cumplimiento de la norma ASTM E1980-11 que habla sobre la práctica estándar para el cálculo del índice de reflectancia solar en superficies opacas horizontales de poca pendiente (*Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces*); la norma ASTM C1549-16, que es el método de prueba estándar para la determinación de reflectancia solar cerca de la temperatura ambiente a partir de reflectómetro solar portátil (*Standard Test Method for Determination of Solar Reflectance Near Ambient Temperature Using a Portable Solar Reflectometer*) y la norma ASTM C1371 que se relaciona con el método de prueba estándar para la determinación de emitancia en los materiales cercanos a la temperatura ambiente usando emisómetro portátil (*Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers*).

Referencias

- Acesco. (s.f.). *Atributos de Materiales*. Obtenido de Acesco Colombia:
<https://www.acesco.com.co/atributos-de-materiales/#Indicereflectancia>.
- Alcaldía de Bucaramanga. (2020). *Plan de desarrollo municipal 2020-2023: Bucaramanga, ciudad de oportunidades*. Alcaldía de Bucaramanga. Obtenido de
<https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/123456789/24463>.
- Alcaldía de Bucaramanga. (2021a). *Plan de Ordenamiento Territorial*. Obtenido de Alcaldía de Bucaramanga:
<https://www.bucaramanga.gov.co/bucaramanga-avanza/plan-de-ordenamiento-territorial/>.
- Alcaldía de Bucaramanga. (2021b). *Cartografía del Plan de Ordenamiento Territorial Municipio de Bucaramanga POT 2014 - 2027*. Obtenido de POT Bucaramanga 2014 - 2027:
<https://mbucaramanga.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=5c32765bb4d544d1a20182ca13fc16b1>.
- Alchapar, N. L., Correa, E. N., & Cantón, M. A. (2012). Índice de reflectancia solar de revestimientos verticales: potencial para la mitigación de la isla de calor urbana. *Ambiente Contruído*, 12(3), 107-123. Obtenido de <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000300008>.^{*2}
- Alchapar, N. L., Paz, S. A., Correa Cantolube, E. N., Gaggino, R., & Josefina, P. M. (2019). Eficiencia energética de cubiertas: Comparativa de propiedades optotérmicas de materiales tradicionales y reciclados. *Actas del XI Congreso regional de tecnología en la arquitectura: Tecnología para una arquitectura regionalmente sustentable* (págs. 296-

* La bibliografía hace parte de las publicaciones, trabajo de grado, libro e investigación con máxima prioridad dentro del presente trabajo

- 305). Mar de Plata: Universidad Nacional de Mar del Plata. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11336/164082>.*
- Alis Restrepo, J. E. (2018). *Metodología para la evaluación energética de edificios comerciales en Colombia basados en estándares y normas internacionales [Tesis, Maestría en Ingeniería Administrativa]*. Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/52242>.
- Amini, N., & Hayati, P. (2020). Effects of CuO nanoparticles as phase change material on chemical, thermal and mechanical properties of asphalt binder and mixture. *Construction and Building Materials*, 251, 118996. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118996>.
- Antoniadis, D., Katsoulas, N., & Papanastasiou, D. K. (2020). Thermal Environment of Urban Schoolyards: Current and Future Design with Respect to Children's Thermal Comfort. *Atmosphere*, 11(11), 1144. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/atmos11111144>.
- ARKOS. (2017). *Ficha Técnica - Ecowall y Ecoroof*. Obtenido de ArkosSistemas: https://www.arkos.com.co/sistemas/images/Im%C3%A1genes_de_nueva_pag/Archivos/Ficha_T%C3%A9cnica_Ecowall_Y_Ecoroof.pdf.
- Arnell, N. W., Lowe, J. A., Bernie, D., Nicholls, R. J., Brown, S., Challinor, A. J., & Osborn, T. J. (2019). The global and regional impacts of climate change under representative concentration pathway forcings and shared socioeconomic pathway socioeconomic scenarios. *Environmental Research Letters*, 14(8), 084046. Obtenido de <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab35a6>.
- Asheichyk, K., & Krüger, M. (2018). Heat radiation and transfer in confinement. *Physical Review B*, 98(19), 195401. Obtenido de <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.195401>.

- Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales*. México, D.F.: Cengage Learning. Obtenido de https://www.academia.edu/42140323/Ciencia_e_ingenieria_de_materia_Askeland_Donald_R_Wright_We_Not_mine_
- Aurora Solar. (2022). *www.aurorasolar.com*. Obtenido de Aurora AI: <https://aurorasolar.com/aurora-ai/>.
- Ávila, R. (2017). El deshielo de los nevados. *Portafolio*. Obtenido de <https://www.portafolio.co/opinion/ricardo-avila/el-deshielo-de-los-nevados-brujula-portafolio-29-marzo-de-2017-504514>.
- Bani Baker, M., Abendeh, R., Abu, Z., & Khedaywi, T. (2016). Production of Sustainable Asphalt Mixes Using Recycled Polystyrene. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 11(1), 183-192. Obtenido de https://www.ripublication.com/ijaes16/ijaesv11n1_15.pdf.
- Bárcena, A., Samaniego, J., Galindo, L. M., Ferrer Carbonell, J., Alatorre, J. E., Stockins, P., . . . Mostacedo, J. (2018). *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe. Una visión gráfica*. Naciones Unidas. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11362/42228>
- Berdahl, P., Akbari, H., Levinson, R., & Miller, W. A. (2008). Weathering of roofing materials – An overview. *Construction and Building Materials*, 22(4), 423-433. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.10.015>.
- Berkeley Lab. (2022). *Cool Pavements*. Obtenido de Heat Island Group: <https://heatisland.lbl.gov/coolscience/cool-pavements>

- Berquist, Z. J., Turaczy, K. K., & Lenert, A. (2020). Plasmon-Enhanced Greenhouse Selectivity for High-Temperature Solar Thermal Energy Conversion. *ACS Nano*, 14(10), 12605-12613. Obtenido de <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c04982>.
- Big Ladder Software. (2016). *Elements (Version 1.0.6) [Software]*. Obtenido de Big Ladder Software LLC: <https://bigladdersoftware.com/projects/elements/>
- Braungart, M., & McDonough, W. (2010). *Cradle to Cradle, einfach intelligent produzieren*. España: Mc GrawHill.
- Braungart, M., & McDonough, W. (2010). *Cradle to Cradle: einfach intelligent produzieren*. McGraw Hill.
- Cabrera, H., Marcano, A., & Castellanos, Y. (2006). Absorption coefficient of nearly transparent liquids measured using thermal lens spectrometry. *Condensed Matter Physics*, 9(2), 385-389. Obtenido de <https://doi.org/10.5488/CMP.9.2.385>
- Calderón Rojas, E. A. (2020). *La guerra comercial entre Estados Unidos y China y su impacto para el sistema multilateral [Tesis, Maestría en Relaciones Internacionales]*. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12010/10111>
- Chatterjee, S., Khan, A., Dinda, A., Mithun, S., Khatun, R., Akbari, H., . . . Wang, Y. (2019). Simulating micro-scale thermal interactions in different building environments for mitigating urban heat islands. *Science of the Total Environment*, 663, 610-631. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.299>
- Chávez Galán, J. (2009). *Evaluación experimental de propiedades térmicas de materiales de construcción nacionales y desarrollo de ventanas ahorradoras de energía [Tesis, Doctorado en Ingeniería]*. Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/60734>

- Chen, M., Xu, G., Wu, S., & Zheng, S. (2010). High-temperature hazards and prevention measurements for asphalt pavement. *International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering* (págs. 1341-1344). Wuhan: IEEE. Obtenido de <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5536275>
- Colciencias. (2018). *8.2 Condiciones específicas para el mecanismo de participación 2: propuestas de proyecto de desarrollo tecnologico y transferencia de conocimiento y/o tecnología para la innovación*. Obtenido de Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación: https://minciencias.gov.co/sites/default/files/8.2_condiciones_mecanismo_de_participacion_2.pdf
- Concrete Sustainability Hub. (2021). *Who We Are*. Obtenido de Concrete Sustainability Hub: <https://cshub.mit.edu/who-we-are>
- Conesa, J. A. (2013). *Mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección, radiación)*. Obtenido de Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/34475/1/Mecanismos%20de%20transmisi%C3%B3n%20de%20calor%20%28CONDUCCION%2C%20CONVECCION%2C%20RADIACION%29.pdf>
- Consejo Colombiano de Construcción Sostenible. (2021). *Acerca del CCCS*. Obtenido de Consejo Colombiano de Construcción Sostenible: <https://www.cccs.org.co/wp/acerca-del-cccs/>
- Cuesta Navarro, J. (2020). *Caracterización de la Isla de Calor Urbana (ICU) mediante el uso de imágenes obtenidas por satélite, procesadas mediante software de código abierto QGIS. Aplicación al caso de Valencia [Tesis, Máster Universitario en Transporte, Territorio y*

- Urbanismo*]. Universitat Politècnica de València. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10251/147986>
- Cuitiño Rosales M. G. Rotondaro, R. E. (2020). Análisis comparativo de aspectos térmicos y resistencias mecánicas de los materiales y los elementos de la construcción con tierra. *Revista de Arquitectura*, 138-151.*
- Dhir, K. (2021). *Evaluation of Urban Heat Island Effect in Cybercity, New Delhi Using a 3D Urban Microclimate Model: Envi-Met [Tesis, Master of Science in Architecture]*. The University of Arizona. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10150/660139>.
- Duan, H., Chen, R., Zheng, Y., & Xu, C. (2018). Photothermal properties of plasmonic nanoshell-blended nanofluid for direct solar thermal absorption. *Optics Express*, 26(23), 29956-29967. Obtenido de <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-26-23-29956&id=400698>.
- El-Hassan, H., & Kianmehr, P. (2017). Sustainability assessment and physical characterization of pervious concrete pavement made with GGBS. *MATEC Web of Conferences*, 120, 07001. Obtenido de <https://doi.org/10.1051/matecconf/201712007001>.
- Endfield, G. H., Veale, L., & Hall, A. (2015). Gordon Valentine Manley and his contribution to the study of climate change: a review of his life and work. *Wires Climate Change*, 6(3), 287-299. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/wcc.334>.
- Engelbreton, C. (2020). *Landsat 1-9 Full Resolution Browse (FRB) Data Format Control Book (DFCB)*. Obtenido de U.S. Geological Survey: <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/LSDS-1823-Landsat-Full-Resolution-Browse-DFCB-v2.pdf>.

- Escalón Alchapar, N., Correa Cantaloube, E., & Lesino, G. (2011). Reflectividad solar de revestimientos horizontales en la envolvente urbana y su capacidad para mitigar la isla de calor. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 28, 37-46. Obtenido de <http://portalderevistas.unsa.edu.ar/ojs/index.php/erma/article/view/1538>.*
- European Commission. (2022). *Herramientas interactivas*. Obtenido de Photovoltaic Geographical Information System: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/
- Evans, M., & de Schiller, S. (1991). *Diseño Bioambiental y arquitectura solar*. Universidad de Buenos Aires.*
- Fernández Alfaro, B. C. (2018). *Elaboración de un protocolo para la vigilancia ambiental y epidemiología de la exposición ocupacional al calor [Trabajo de grado, Ingeniería en Seguridad y Prevención de Riesgos]*. Universidad Andrés Bello. Obtenido de <http://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/10929>.
- Fernández Cheliz, D. (2021). *Edificios energéticamente sostenibles. Evaluación de propuestas de mejora en edificios universitarios existentes [Tesis, Maestría en Energía: Generación, Gestión y Uso Eficiente]*. Universidad de Valencia. Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/47782>.
- Fraile Narvaez, M. (Ed.). (2019). *Biomimesis: el camino hacia un diseño eficiente*. Marcelo Alejandro Fraile. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/336231845_Biomimesis_El_camino_hacia_un_diseno_eficiente.
- Gao, Y. (2020). *Assessing the relationship between urban structure and the urban heat island: Improving local climate zone mapping and estimating zonal and sub-zonal scale effects on*

- air temperature [Tesis, Master of Science in Environmental Science]*. American University. Obtenido de <http://hdl.handle.net/1961/auislandora:85708>.
- García Arbeláez, C. (2016). *El Acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático*. Fundación Natura, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, WWF-Colombia. Obtenido de https://www.asocapitales.co/nueva/wp-content/uploads/2020/06/As%C3%AD_actuar%C3%A1_Colombia_frente_al_cambio_clim%C3%A1tico.pdf.
- Godbole, S., & Bhargava, R. (2016). Understanding the factors contributing in the formation of canopy level urban heat island – a case study of Nagpur city. *9th International Conference of Faculty of Architecture Research Unit (FARU) - 2016* (págs. 111-125). Moratuwa: University of Moratuwa. Obtenido de <http://dl.lib.mrt.ac.lk/handle/123/13018>.
- Gómez Concepción, H., Rojas Márquez, I., & Perén Montero, J. I. (2021). Una aproximación a los efectos del diseño urbano en el microclima y calidad de espacios urbanos de una ciudad cálida-húmeda: Panamá. *SusBCity*, 3(1), 31-38. Obtenido de <https://revistas.up.ac.pa/index.php/SusBCity/article/view/2009>.
- Guattari, C., Evangelisti, L., & Balaras, C. A. (2018). On the assessment of urban heat island phenomenon and its effects on building energy performance: A case study of Rome (Italy). *Energy and Buildings*, 158, 605-615. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.050>.
- Guo, Y., Gasparini, A., Li, S., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A. M., Zanotti Stagliorio Coelho, M. S., Tong, S. (2018). Quantifying excess deaths related to heatwaves under climate change scenarios: A multicountry time series modelling study. *PLoS medicine*, 15(7), 18-42. Obtenido de <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002629>.

- Gutiérrez Hernández, O. (2018). Impacto del calentamiento global en la distribución y supervivencia del pinsapo (Serranía de Ronda). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*(76), 504-549. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6388653>
- Heaviside, C., Macintyre, H., & Vardoulakis, S. (2017). The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Current Environmental Health Reports*, 4(3), 296-305. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>.
- Howard, L. (2012). *The climate of London: Deduced from meteorological observations*. Cambridge University Press.
- Huang, J. M., & Chen, L. C. (2020). A Numerical Study on Mitigation Strategies of Urban Heat Islands in a Tropical Megacity: A Case Study in Kaohsiung City, Taiwan. *Sustainability*, 12(10), 3952. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/su12103952>
- IDEAM. (2005). *Atlas climatológico de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2010). *2a Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Editorial Scripto Ltda. Obtenido de https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dln_download&p=21697
- IDEAM. (2011). *Clasificaciones climáticas Colombia*. Grupo de Climatología y Agrometeorología, Subdirección de Meteorología.
- IDEAM. (2016). *Promedios Climatológicos 1981 2010*. Obtenido de Clima: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/553571/Promedios+Climatol%C3%B3gicos++1981+-+2010.xlsx/f28d0b07-1208-4a46-8ccf-bddd70fb4128>

IDEAM. (2017). *Resultados monitoreo de la deforestación 2017*. Obtenido de IDEAM: http://www.ideam.gov.co/documents/24277/72115631/Actualizacion_cifras2017+FINAL.pdf/40bc4bb3-370c-4639-91ee-e4c6cea97a07.

IDEAM. (2022). *Reporte series anuales-multianuales de datos climatológicos: Bucaramanga*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (s.f.a). *Radiación solar*. Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar>.

IDEAM. (s.f.b). *Climatología: Régimen anual de viento*. Obtenido de Meteorología Aeronáutica: Captura de Información : <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/rosas/viento.htm>.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP y Cancillería. (2015). *Nuevos Escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100*. Obtenido de Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias: <https://observatorio.epacartagena.gov.co/nuevos-escenarios-de-cambio-climatico-para-colombia-2011-2100/>.

Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (4a ed.). Naucalpan de Juárez: Prentice Hall. Obtenido de https://www.academia.edu/37028342/Fundamentos_de_transferencia_de_calor_Frank_Incropera.

Instituto de la Construcción de Castilla y León. (2007). *Prontuario de soluciones constructivas / materiales*. Obtenido de CTE Web: <http://cte-web.iccl.es/materiales.php?a=22>

IPCC. (2013). *Cambio Climático 2013: bases físicas*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Obtenido de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf.

- Kakoniti, A., Georgiou, G., Marakkos, K., Kumar, P., & Neophytou, M. K. (2016). The role of materials selection in the urban heat island effect in dry mid-latitude climates. *Environmental Fluid Mechanics*, 16, 347-371. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s10652-015-9426-z>.
- Kalogeropoulos, G., Dimoudi, A., Touboulidis, P., & Zoras, S. (2022). Urban Heat Island and Thermal Comfort Assessment in a Medium-Sized Mediterranean City. *Atmosphere*, 13(7), 1102. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/atmos13071102>.
- Kimmig, S. E., Beninde, J., Brandt, M., Schleimer, A., Kramer-Schadt, S., Hofer, H., . . . Frantz, A. (2020). Beyond the landscape: Resistance modelling infers physical and behavioural gene flow barriers to a mobile carnivore across a metropolitan area. *Molecular Ecology*, 29(3), 466-484. Obtenido de <https://doi.org/10.1111/mec.15345>.
- Kraus, S., Breier, M., & Dasí-Rodríguez, S. (2020). The art of crafting a systematic literature review in entrepreneurship research. *International Entrepreneurship and Management Journal*, 16(3), 1023-1042. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11365-020-00635-4>.
- Levinson, R. (2004). *Solar Reflectance Index (SRI) Calculator*. Obtenido de The Cool Colors Project: https://coolcolors.lbl.gov/assets/docs/SRI%20Calculator/SRI-calc10.xls.*
- Liu, Y., Li, Q., Yang, L., Mu, K., Zhang, M., & Liu, J. (2020). Urban heat island effects of various urban morphologies under regional climate conditions. *Science of The Total Environment*, 743, 140589. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140589>.
- Liu, Y., Liu, W., Gao, Q., Huang, Y., Li, P., & Wang, Y. (2021). *Analysis of Heat Absorption and Collection Based on Solid Structures Collector*. Obtenido de Preprints: <https://doi.org/10.20944/preprints202106.0217.v1>.

- Liu, Z., Brown, R. D., Zheng, S., Zhang, L., & Zhao, L. (2020). The effect of trees on human energy fluxes in a humid subtropical climate region. *International Journal of Biometeorology*, 64(10), 1675-1686. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01948-3>.
- Manoli, G., Fatichi, S., Schlöpfer, M., Yu, K., Crowther, T. C., Meili, N., . . . Bou-Zeid, E. (2019). Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 573, 55-60. Obtenido de <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9>
- Martín Monroy, D. M. (1995). *Comportamiento térmico de cerramientos soleados : un modelo de simulación por diferencias finitas [Tesis, Doctorado en Arquitectura]*. Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=235003>.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Fundación Biodiversidad, OECC, AEMET y CENEAM. (2014). *Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/guia-resumida-gt2-impactos-adaptacion-vulnerabilidad-ar5_tcm30-177778.pdf.
- Miramontes Carballada, Á. (2020). La industria forestal de España en la Economía circular, ¿su integración es posible? *Anales de geografía de la Universidad Complutense (Vol. 40, No., 40(2))*, 439-465. Obtenido de <https://doi.org/10.5209/aguc.72982>.
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of*

- Environmental Management*, 197, 522-538. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095>.
- Municipio de Bucaramanga. (2014). *Plan de Ordenamiento Territorial de Bucaramanga: segunda generacion 2013-2027*. Secretaría de Planeación.
- Muñoz Salamanca, E. A. (2020). *Análisis y Factibilidad de costos en proyectos de construcción sostenible [Tesis, Maestría en Construcción]*. Universidad Nacional. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78362>.
- Murana, A. A., Akilu, K., & Olowosulu, A. T. (2020). Use of expanded polystyrene from disposable food pack as a modifier for bitumen in hot mix asphalt. *Nigerian Journal of Technology*, 39(4), 1021-1028. Obtenido de <https://doi.org/10.4314/njt.v39i4.7>.
- Naciones Unidas. (1998). *Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. Kyoto: Naciones Unidas. Obtenido de <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.
- Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París*. París: Naciones Unidas. Obtenido de https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf.
- Nakano, A. (2015). *Urban weather generator user interface development : towards a usable tool for integrating urban heat island effect within urban design process [Tesis, Mater of Science in Building Technology]*. Massachusetts Institute of Technology. Obtenido de <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/7582>.
- NASA. (2013). *Landsat Science*. Obtenido de National Aeronautics and Space Administration: https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/*
- Neila González, F. J. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Editorial Munilla-Lería.*

- Novillo Rameix, N. N. (2018). Cambio climático y conflictos socioambientales en ciudades intermedias de América Latina y el Caribe. *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*(24), 124-142. Obtenido de <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.24.2018.3323>.
- OECC, Fundación Bioiversidad, AEMET y CENEAM. (2013). *Cambio Climático: Bases físicas. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC-Grupo de trabajo I*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Obtenido de http://www.oscc.gob.es/contenidos/documentos/03_Guia_resumida_AR5_IPCC_Bases_Fisicas_es.htm.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates* (2nd ed.). Taylor & Francis Group. Obtenido de https://doi.org/10.4324/9780203407219.*
- Ordóñez Martín, M., & Gómez de Cózar, J. C. (2020). Coberturas sostenibles en excavaciones arqueológicas: metodología de aplicación al caso de mosaicos en el Conjunto Arqueológico de Itálica (Santiponce, Sevilla). *Ge-conservación*, 17(1), 202-214. Obtenido de <https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.757>.
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Organización Mundial de la Salud. Obtenido de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/69478>.
- Palacio Chaverra, C. A. (2019). *Medidas de adaptación/mitigación ante islas de calor en el Valle de Aburrá [Trabajo de grado, Ingeniería Ambiental]*. Universidad de Antioquia. Obtenido de <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2334>.

- Papadimitriou, C. N., Psomopoulos, C. S., & Kehagia, F. (2019). A review on the latest trend of Solar Pavements in Urban Environment. *Energy Procedia*, 157, 945-952. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.261>.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2021a). *Objetivo 12: Producción y consumo responsable*. Obtenido de Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo: <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-12-responsible-consumption-and-production.html#:~:text=Para%20lograr%20crecimiento%20econ%C3%B3mico%20y,consumo%20de%20bienes%20y%20recursos>.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2021b). *Objetivo 13: Acción por el clima*. Obtenido de Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo: <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-13-climate-action.html>.
- Quinta-Ferreira, M., Dias, J. F., & Alija, S. (2016). False low water content in road field compaction control using nuclear gauges: a case study. *Environmental Earth Sciences*, 75(14), 1114. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5901-1>.
- Salami Magar, D., Salami Magar, R. K., & Chidi, C. L. (2021). Assessment of urban heat island in Kathmandu valley (1999-2017). *Geographical Journal of Nepal*, 14, 1-20. Obtenido de <https://doi.org/10.3126/gjn.v14i0.35544>.
- Salas-Esparza, M. G., & Herrera-Sosa, L. C. (2017). La vegetación como sistema de control para las Islas de Calor Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Hábitat Sustentable*, 7(1), 14-23. Obtenido de <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/2737>.

- Salinas Jalca, J. R. (2020). *Plan de áreas verdes con plantas nativas y/o endémicas para mitigación de islas de calor en la parroquia Letamendi, Guayaquil [Trabajo de grado, Arquitectura]*. Universidad de Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/51189>.
- Sánchez Sánchez, C., Nuñez Peiró, M., & Neila González, F. J. (2017). Isla de calor urbana y población vulnerable. El caso de Madrid. *Proceedings of the 3rd International Congress on Sustainable Construction and Eco-efficient Solutions* (págs. 545-556). Sevilla: Universidad de Sevilla. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7546891>.*
- Shams, M. (2021). *Urban Heat Mitigation for Current and Future Conditions: A case study for downtown London ON [Tesis, Master of Engineering Science]*. Western University. Obtenido de <https://ir.lib.uwo.ca/etd/8098>.
- Shlomo, A., Parent, J., Civco, D. L., & Blei, A. M. (2011). *Making Room for a planet of cities*. Lincoln Institute of Land Policy. Obtenido de <https://www.lincolnst.edu/es/publications/policy-focus-reports/making-room-planet-cities>.
- Shooshtarian, S., Rajagopalan, P., & Sagoo, A. (2018). A comprehensive review of thermal adaptive strategies in outdoor spaces. *Sustainable Cities and Society*, 41, 647-665. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.005>
- Simón Grau, J., & López Ayerra, J. (2018). Pavimentos reflectantes para la mitigación del cambio climático. Parte I: Estudio teórico y de laboratorio. *Asfalto y Pavimentación*, 28(8), 13-25. Obtenido de <https://docplayer.es/82403138-Pavimentos-reflectantes-para-la-mitigacion-del-cambio-climatico-parte-i-estudio-teorico-y-de-laboratorio.html>.

- Sobstyl, J. M., Emig, T., Abdolhosseini Qomi, M. J., Ulm, F. J., & Pellenq, R. J. (2018). Role of City Texture in Urban Heat Islands at Nighttime. *Physical Review Letters*, 120(10), 108701. Obtenido de <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.108701>.
- Spalierno, M. (2021). *Estudio de materiales termocrómicos innovadores: Análisis de mitigación de la isla de calor urbano [Tesis, Máster en Gestión Integral de la Edificación]*. Universidad de Sevilla. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11441/126936>.
- Suzer, O. (2019). Analyzing the compliance and correlation of LEED and BREEAM by conducting a criteria-based comparative analysis and evaluating dual-certified projects. *Building and Environment*, 147, 158-170. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.001>.
- Synnefa, A., Karlessi, T., Gaitani, N., Santamouris, M., Assimakopoulos, D., & Papakatsikas, C. (2011). Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. *Building and Environment*, 16(1), 38-44. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.014>.*
- Taha, H. (2000). LBNL Report #: LBNL-44222. *Meteorological and air quality impacts of heat island mitigation measures in three U.S. cities*. Lawrence Berkeley National Laboratory. Obtenido de Lawrence Berkeley National Laboratory: <https://escholarship.org/uc/item/9bh7t157>.*
- Tarasov, M., Gunbina, A., Yusupov, R., Chekushkin, A., Nagirnaya, D., Lemzyakov, S., . . . Winkler, D. (2021). Non-Thermal Absorption and Quantum Efficiency of SINIS Bolometer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31(5), 2300105. Obtenido de <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3057327>.

- Thorsson, S., Rayner, D., Palm, G., Lindberg, F., Carlström, E., Börjesson, M., . . . Holmer, B. (2021). Is Physiological Equivalent Temperature (PET) a superior screening tool for heat stress risk than Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT) index? Eight years of data from the Gothenburg half marathon. *British Journal of Sports Medicine*, 55(15), 825-830. Obtenido de <https://bjsm.bmj.com/content/55/15/825.info>.
- U.S. Geological Survey. (s.f.). *EarthExplorer*. Obtenido de USGS: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Urrutia del Campo, N., & Neila González, J. (2019). Bioclimática, mediciones ambientales y uso de los espacios urbanos: evaluación comparativa en la Plaza de Chamberí, Madrid. *REVISTARQUIS*, 9(1), 1-26. Obtenido de <https://doi.org/10.15517/ra.v9i1.40257>.*
- Wan, W. C., Hien, W. N., Ping, T. P., & Aloysius, A. Z. (2012). A Study of the Effectiveness of Heat-Mitigating Pavement Coatings in Singapore. *Journal of Heat Island Institute International*, 7-2, 238-247. Obtenido de https://www.heat-island.jp/web_journal/HI2009Conf/pdf/35.pdf.
- Wang, Y., Berardi, U., & Akbari, H. (2016). Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. *Energy and Buildings*, 114, 2-19. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>.
- WWF. (2018). *Glosario ambiental : ¿Sabes qué se pactó en el Acuerdo de París?* Obtenido de WWF: <https://www.wwf.org.co/?334976/Glosario-ambiental--Sabes-que-se-pacto-en-el-Acuerdo-de-Paris>.
- Xiao, D., & Xue, C. (2020). *Strategies for coastal Cities to Cope with Flood disaster and Urban Heat Island Effect in the Context of climate Change [Tesis, Corso di laurea magistrale in Pianificazione Territoriale, Urbanistica E Paesaggistico-Ambientale]*. Politecnico di Torino. Obtenido de <http://webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/17104>.

- Xiao, Y., & Watson, M. (2019). Guidance on Conducting a Systematic Literature Review. *Journal of Planning Education and Research*, 39(1), 93-112. Obtenido de <https://doi.org/10.1177/0739456X17723971>.
- Xu, H. J., Xing, Z. B., Wang, F. Q., & Cheng, Z. M. (2019). Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nanofluids in porous media: Fundamentals and applications. *Chemical Engineering Science*, 195, 462-483. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.09.045>.*
- Xu, X., AzariJafari, H., Gregory, J., Norford, L., & Kirchain, R. (2020). An integrated model for quantifying the impacts of pavement albedo and urban morphology on building energy demand. *Energy and Buildings*, 211, 109759. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109759>.
- Yu, Z., Yao, Y., Yang, G., Wang, X., & Vejre, H. (2019). Strong contribution of rapid urbanization and urban agglomeration development to regional thermal environment dynamics and evolution. *Forest Ecology and Management*, 446, 214-225. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.046>.
- Yusputri, R. M., Saleh, S. M., & Isya, M. (2020). The effect of wood ash and styrofoam on the characteristics of AC-WC mixture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 933, 012003. Obtenido de <https://doi.org/10.1088/1757-899X/933/1/012003>.

Apéndices

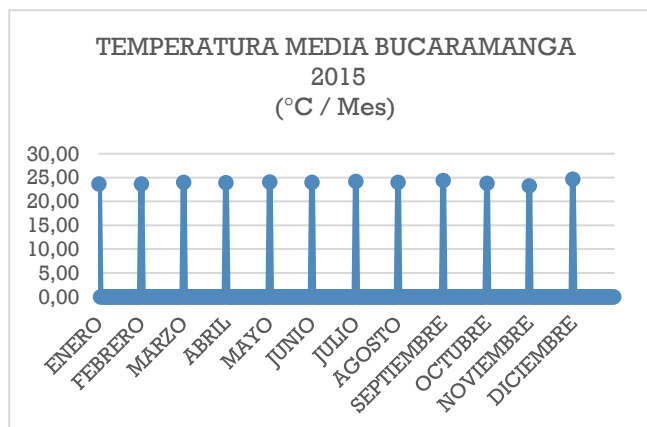
Apéndice A. Temperatura 2015-2020 para Bucaramanga

La temperatura media es el promedio de las temperaturas originadas en 24 horas por día y a su vez, en 28, 29, 30 o 31 días por mes en grados Celsius - °C; así es claro tener una trazabilidad desde el año 2015 al 2020.

Los meses con mayor temperatura según el registro de información para la ciudad de Bucaramanga procedente del IDEAM para las estaciones activas en el año 2015, se encuentra en los meses de septiembre y diciembre.

Temperatura Media mensual 2015 - Bucaramanga

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL 2015 (°C)	
Enero	23.65
Febrero	23.64
Marzo	23.97
Abril	23.93
Mayo	24.07
Junio	23.97
Julio	24.17
Agosto	24.00
Septiembre	24.41
Octubre	23.77
Noviembre	23.25
Diciembre	24.64

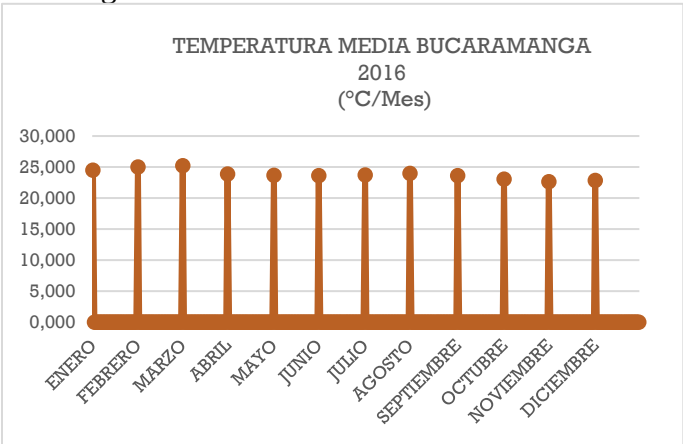


Adaptado de IDEAM (2022).

Para el año 2016 los meses con mayor temperatura media registrados se encuentran en los meses de febrero y marzo.

Temperatura Media Mensual 2016 – Bucaramanga

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL 2016 (°C)	
Enero	24.49
Febrero	25.00
Marzo	25.20
Abril	23.86
Mayo	23.65
Junio	23.63
Julio	23.71
Agosto	24.00
Septiembre	23.64
Octubre	23.07
Noviembre	22.66
Diciembre	22.86

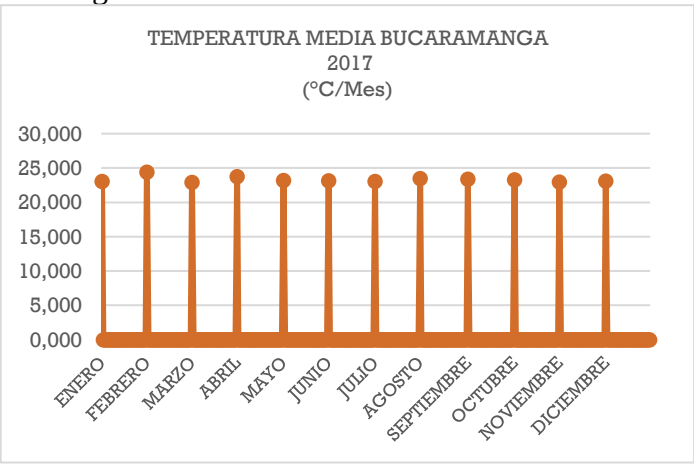


Adaptado de IDEAM (2022).

Para el año 2017 los meses con mayor temperatura media registrados se encuentran en los meses de febrero y abril.

Temperatura Media mensual 2017 - Bucaramanga

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL 2017 (°C)	
Enero	23.03
Febrero	24.38
Marzo	22.90
Abril	23.75
Mayo	23.19
Junio	23.13
Julio	23.06
Agosto	23.47
Septiembre	23.38
Octubre	23.27
Noviembre	22.94
Diciembre	23.09

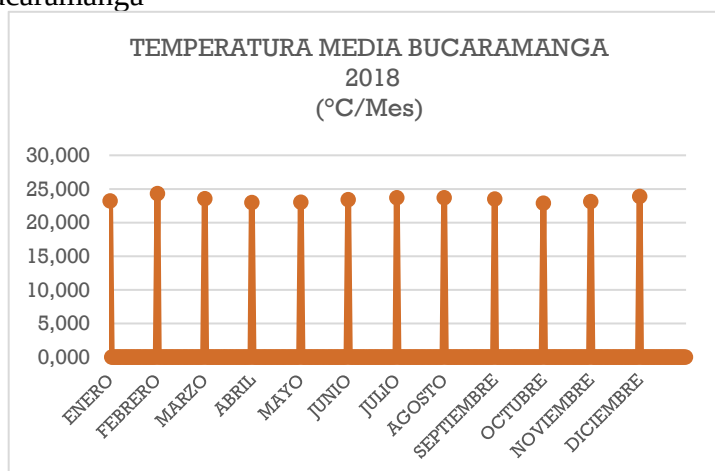


Adaptado de IDEAM (2022).

Para el año 2018 los meses con mayor temperatura media registrados se encuentran en los meses de febrero y diciembre.

Temperatura Media mensual 2018 – Bucaramanga

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL 2018 (°C)	
Enero	23.20
Febrero	24.33
Marzo	23.56
Abril	22.99
Mayo	23.03
Junio	23.38
Julio	23.67
Agosto	23.68
Septiembre	23.49
Octubre	22.88
Noviembre	23.12
Diciembre	23.86

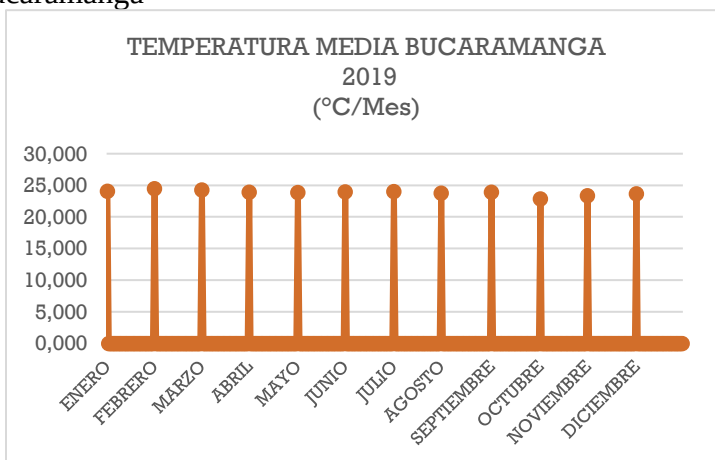


Adaptado de IDEAM (2022).

Para el año 2019 los meses con mayor temperatura media registrados se encuentran en los meses de febrero y marzo.

Temperatura Media mensual 2019 – Bucaramanga

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL 2019 (°C)	
Enero	24.05
Febrero	24.50
Marzo	24.27
Abril	23.92
Mayo	23.89
Junio	23.96
Julio	24.02
Agosto	23.79
Septiembre	23.93
Octubre	22.85
Noviembre	23.35
Diciembre	23.65

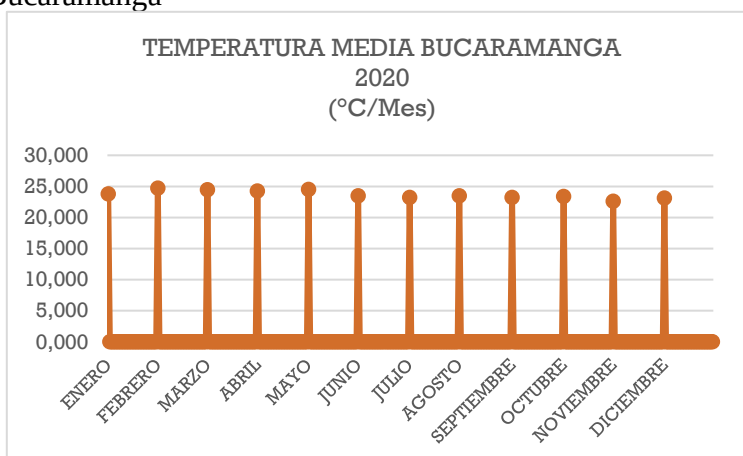


Adaptado de IDEAM (2022).

Para el año 2020 los meses con mayor temperatura media registrados se encuentran en los meses de febrero y abril.

Temperatura Media mensual 2020 – Bucaramanga

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL 2020 (°C)	
Enero	23.81
Febrero	24.70
Marzo	24.45
Abril	24.27
Mayo	24.49
Junio	23.51
Julio	23.24
Agosto	23.50
Septiembre	23.26
Octubre	23.40
Noviembre	22.63
Diciembre	23.10



Adaptado de IDEAM (2022).

Temperatura Media Anual - Bucaramanga 2015-2020

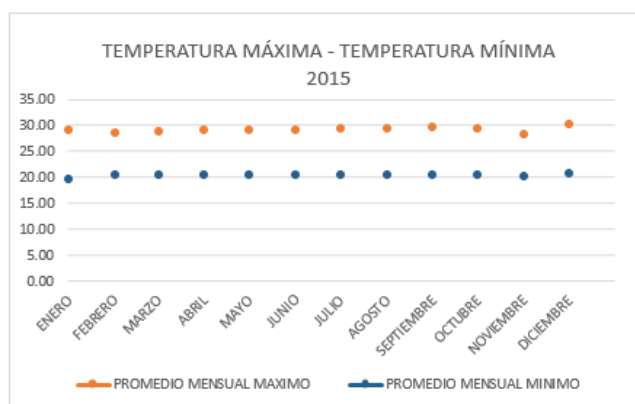
TEMPERATURA MEDIA ANUAL BUCARAMANGA 2015-2020 (°C)	
Enero	23.71
Febrero	24.43
Marzo	24.06
Abril	23.79
Mayo	23.72
Junio	23.60
Julio	23.65
Agosto	23.74
Septiembre	23.68
Octubre	23.21
Noviembre	22.99
Diciembre	23.54

Adaptado de IDEAM (2022).

Para el año 2015 se tiene un paralelo de los meses con mayor temperatura y menor temperatura media mensual, dónde diciembre se define como el mes más caliente con una media de 30.25 °C y enero con una media de temperatura baja de 19.72 °C contrasta como el mes con menores temperaturas, en las zonas horarias entre las 4:00 y las 6:00 de la mañana, caracterizadas como heladas. La diferencia de temperatura es evidente en 10.53 ° C.

Temperatura Máxima Vs. Temperatura Mínima media mensual 2015

TEMPERATURA MÁXIMA Vs TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA MENSUAL – 2015 (°C)		
MES	TEMP. MÁX.	TEMP. MÍN.
Enero	28.92	19.72
Febrero	28.53	20.31
Marzo	28.63	20.49
Abril	29.15	20.50
Mayo	29.12	20.48
Junio	29.08	20.41
Julio	29.25	20.50
Agosto	29.41	20.37
Septiembre	29.58	20.47
Octubre	29.23	20.34
Noviembre	28.22	20.10
Diciembre	30.25	20.77

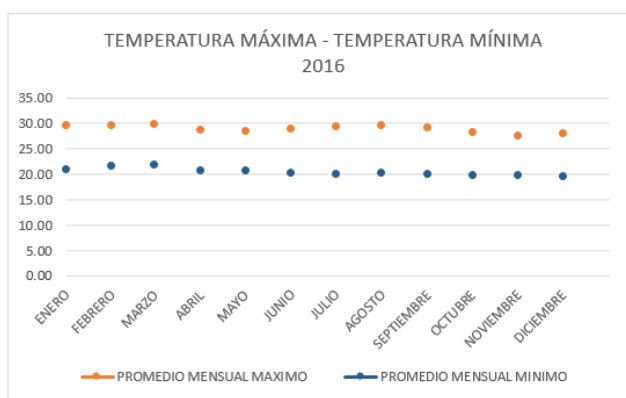


Adaptado de IDEAM (2022).

Para el año 2016 se tiene un paralelo de los meses con mayor temperatura y menor temperatura media mensual, dónde **marzo** se define como el mes más caliente con una media de **29.66 °C** y **diciembre** con una media de temperatura baja de **19.52 °C** contrasta como el mes con menores temperaturas.

Temperatura Máxima Vs. Temperatura Mínima media mensual 2016

TEMPERATURA MÁXIMA Vs TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA MENSUAL – 2016 (°C)		
MES	TEMP. MÁX.	TEMP. MÍN.
Enero	29.46	20.93
Febrero	29.59	21.60
Marzo	29.66	21.71
Abril	28.52	20.61
Mayo	28.30	20.55
Junio	28.91	20.09
Julio	29.19	19.84
Agosto	29.43	20.04
Septiembre	29.07	19.96
Octubre	28.23	19.71
Noviembre	27.36	19.65
Diciembre	27.86	19.52

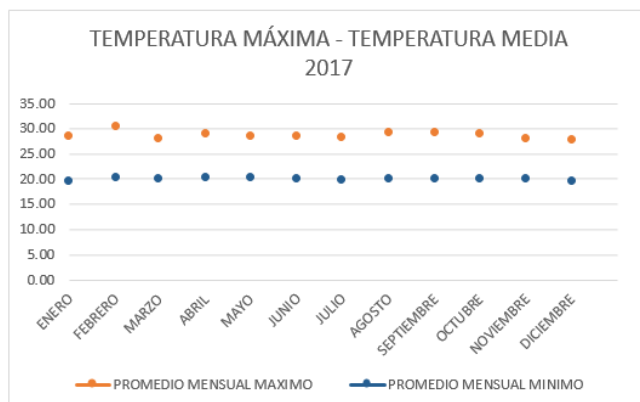


Adaptado de IDEAM (2022).

Para el año 2017 se tiene un paralelo de los meses con mayor temperatura y menor temperatura media mensual, dónde **febrero** se define como el mes más caliente con una media de **30.27 °C** y **enero** con una media de temperatura baja de **19.48 °C** contrasta como el mes con menores temperaturas.

Temperatura Máxima Vs. Temperatura Mínima media mensual 2017

TEMPERATURA MÁXIMA Vs TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA MENSUAL – 2017 (°C)		
MES	TEMP. MÁX.	TEMP. MÍN.
Enero	28.32	19.48
Febrero	30.27	20.09
Marzo	27.99	19.81
Abril	28.91	20.15
Mayo	28.30	20.08
Junio	28.33	19.94
Julio	28.19	19.70
Agosto	29.02	19.83
Septiembre	29.18	19.95
Octubre	28.82	20.01
Noviembre	27.95	19.86
Diciembre	27.73	19.55

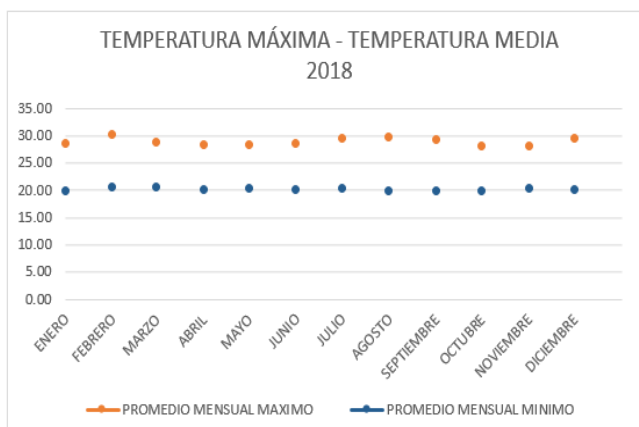


Adaptado de IDEAM (2022).

Para el año 2018 se tiene un paralelo de los meses con mayor temperatura y menor temperatura media mensual, donde **febrero** se define como el mes más caliente con una media de **30.03 °C** y **agosto** y **octubre** con una media de temperatura baja de **19.68 °C** contrasta como el mes con menores temperaturas.

Temperatura Máxima Vs. Temperatura Mínima media mensual 2018

TEMPERATURA MÁXIMA Vs TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA MENSUAL – 2018 (°C)		
MES	TEMP. MÁX.	TEMP. MÍN.
Enero	28.44	19.76
Febrero	30.03	20.47
Marzo	28.60	20.49
Abril	28.06	19.84
Mayo	28.17	20.08
Junio	28.36	20.01
Julio	29.26	20.08
Agosto	29.51	19.68
Septiembre	29.18	19.77
Octubre	27.95	19.68
Noviembre	27.81	20.13
Diciembre	29.37	19.83



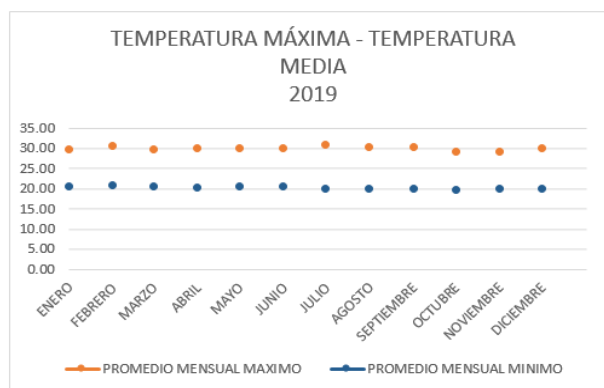
Adaptado de IDEAM (2022).

Para el año 2019 se tiene un paralelo de los meses con mayor temperatura y menor temperatura media mensual, donde **julio** se define como el mes más caliente con una media de **30.49 °C** y **octubre** con una media de temperatura baja de **19.50 °C** contrasta como el mes con menores temperaturas.

Temperatura Máxima Vs. Temperatura Mínima media mensual 2019

TEMPERATURA MÁXIMA Vs TEMPERATURA MÍNIMA
MEDIA MENSUAL – 2019 (°C)

MES	TEMP. MÁX.	TEMP. MÍN.
Enero	29.52	20.18
Febrero	30.26	20.65
Marzo	29.62	20.19
Abril	29.77	20.14
Mayo	29.73	20.26
Junio	29.79	20.23
Julio	30.49	19.78
Agosto	30.13	19.67
Septiembre	30.05	19.67
Octubre	28.97	19.50
Noviembre	29.00	19.73
Diciembre	29.78	19.83



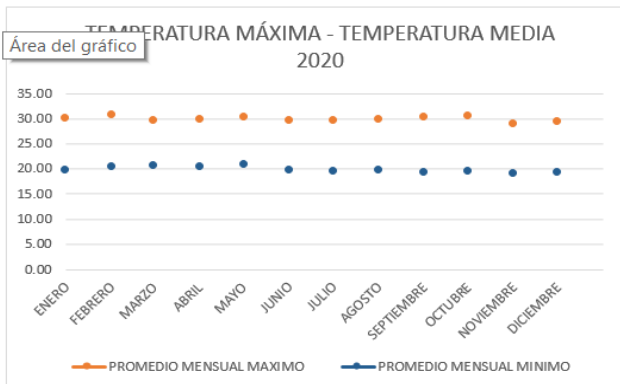
Adaptado de IDEAM (2022).

Para el año 2020 se tiene un paralelo de los meses con mayor temperatura y menor temperatura media mensual, donde **febrero** se define como el mes más caliente con una media de **30.53 °C** y **noviembre** con una media de temperatura baja de **19.03 °C** contrasta como el mes con menores temperaturas.

Temperatura Máxima Vs. Temperatura Mínima media mensual 2020

TEMPERATURA MÁXIMA Vs TEMPERATURA MÍNIMA
MEDIA MENSUAL – 2020 (°C)

MES	TEMP. MÁX.	TEMP. MÍN.
Enero	29.89	19.67
Febrero	30.53	20.41
Marzo	29.58	20.50
Abril	29.72	20.23
Mayo	30.22	20.68
Junio	29.43	19.59
Julio	29.46	19.42
Agosto	29.75	19.70
Septiembre	30.12	19.26
Octubre	30.34	19.36
Noviembre	28.86	19.03
Diciembre	29.40	19.20



Adaptado de IDEAM (2022).

Temperatura Máxima Vs. Temperatura Mínima Media Anual 2015-2020

TEMPERATURA MÁXIMA Vs TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA ANUAL 2015-2020 (°C)		
MES	TEMP. MÁX.	TEMP. MÍN.
Enero	29.09	19.96
Febrero	29.89	20.59
Marzo	29.01	20.53
Abril	29.02	20.25
Mayo	28.97	20.35
Junio	28.98	20.05
Julio	29.31	19.88
Agosto	29.54	19.88
Septiembre	29.53	19.85
Octubre	28.92	19.77
Noviembre	28.20	19.75
Diciembre	29.07	19.78

Adaptado de IDEAM (2022).

Es pertinente resaltar los días entre el 2015 y el 2020 con mayor y menor temperatura para correlacionar un incremento y un decremento en el transcurrir de los años, que amplifican los contrastes de temperatura, caracterizados por días muy calientes hasta el 2020 versus días más fríos.

Temperatura Máxima Diaria Anual 2015-2020

TEMPERATURA MÁXIMA DIARIA ANUAL 2015-2020 (Año - Mes - Hora militar - temp. °C)				
AÑO	MES	DÍA	HORA	TEMPERATURA
2015	Septiembre	15	12:30	32.7
2016	Abril	19	12:08	32.7
2017	Agosto	18	12:03	32.1
	Julio	9	11:09	31.9
2018	Septiembre	20	13:04	31.9
	Septiembre	30	12:52	31.9
2019	Marzo	9	11:40	33.1
2020	Febrero	19	13:00	33.8

TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA ANUAL 2015-2020 (Año - Mes - Hora militar - temp. °C)				
AÑO	MES	DÍA	HORA	TEMPERATURA
2015	Enero	7	6:07	17.7
2016	Noviembre	22	5:39	17.4
2017	Octubre	29	4:00	17.8
	Diciembre	12	6:06	17.8
2018	Julio	3	3:35	18
2019	Marzo	2	2:57	12.5
2020	Noviembre	1	5:14	17.6

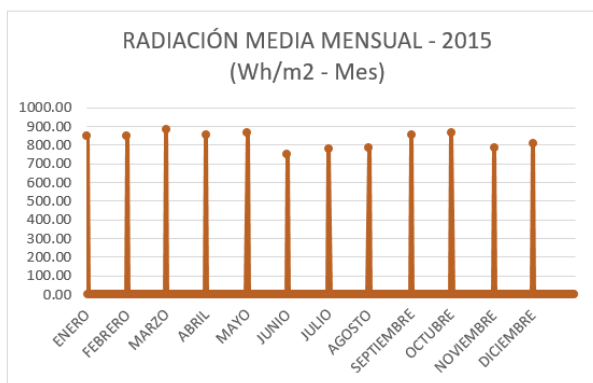
Adaptado de IDEAM (2022).

Apéndice B. Radiación 2015-2020 para Bucaramanga

La radiación es la emisión de energía por parte del sol, propagada en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas (IDEAM, s.f.a), obtenidas en Kilovatio hora sobre el área en metros - KWh/m². La radiación solar automática comprendida entre el 2015 y 2020 se evidencia con mayor incidencia de los rayos solares hacia el mes de septiembre entre el 20 y 23, días en los cuales se abre paso al equinoccio, donde sobre la línea del ecuador se da una radiación directa con un ángulo recto entre el sol y la superficie terrestre en ese punto.

Radiación Media Mensual 2015

RADIACIÓN MEDIA MENSUAL 2015 (Wh/m ²)	
Enero	849.55
Febrero	850.14
Marzo	880.81
Abril	854.20
Mayo	867.74
Junio	752.93
Julio	781.26
Agosto	784.29
Septiembre	852.93
Octubre	865.13
Noviembre	782.80
Diciembre	808.52

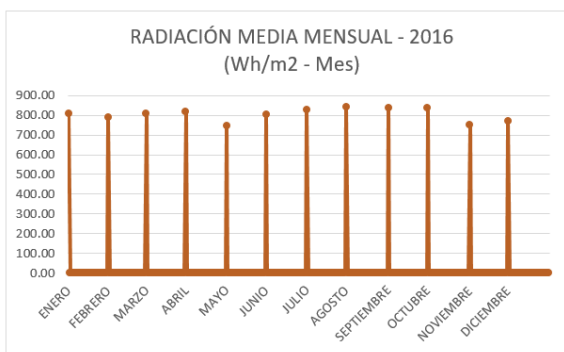


Adaptado de IDEAM (2022).

En el año 2015 se genera la mayor radiación en el mes de **marzo** con **880.81 W/m²**, coincidiendo con el equinoccio de marzo donde el día y la noche tienen igual duración.

Radiación Media Mensual 2016

RADIACIÓN MEDIA MENSUAL 2016 (Wh/m ²)	
Enero	810.45
Febrero	789.97
Marzo	806.97
Abril	816.03
Mayo	746.42
Junio	804.70
Julio	826.84
Agosto	843.45
Septiembre	837.87
Octubre	834.77
Noviembre	751.60
Diciembre	770.23

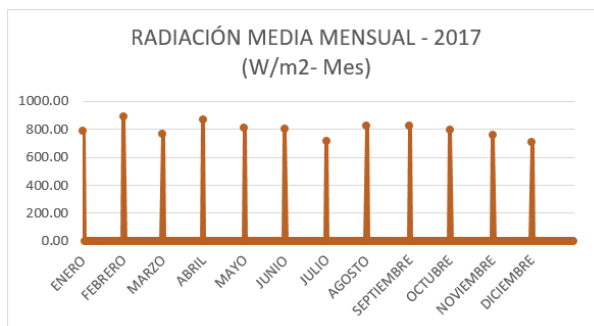


Adaptado de IDEAM (2022).

En el año 2016 se genera la mayor radiación en el mes de **agosto** con **843.45 W/m²**.

Radiación Media Mensual 2017

RADIACIÓN MEDIA MENSUAL 2017 (Wh/m ²)	
Enero	783.52
Febrero	888.64
Marzo	766.55
Abril	869.30
Mayo	809.97
Junio	800.97
Julio	714.32
Agosto	822.26
Septiembre	821.33
Octubre	795.68
Noviembre	756.90
Diciembre	708.58

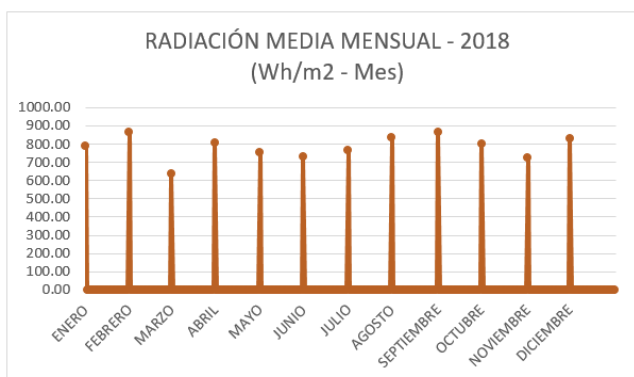


Adaptado de IDEAM (2022).

Para el año 2017 se genera la mayor radiación en el mes de **febrero** con **888.64 W/m²**.

Radiación Media Mensual 2018

RADIACIÓN MEDIA MENSUAL 2018 (Wh/m ²)	
Enero	787.00
Febrero	864.57
Marzo	639.16
Abril	805.03
Mayo	751.00
Junio	728.90
Julio	762.68
Agosto	837.71
Septiembre	864.77
Octubre	802.87
Noviembre	727.10
Diciembre	827.94



Adaptado de IDEAM (2022).

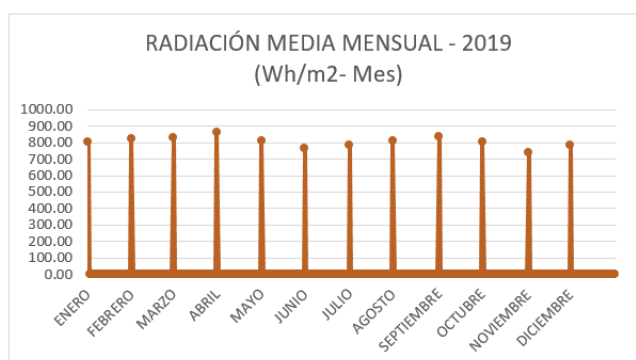
Para el año 2018 se genera la mayor radiación en el mes de **septiembre** con **864.77 W/m²**.

Cabe destacar la ubicación cercana de Colombia a la línea del Ecuador que posibilita una radiación directa del sol en equinoccio, entre el 20 y 23 de septiembre, con una proyección de los rayos solares completamente perpendicular al plano de la tierra y por ende un resultado de mayor radiación.

Para el año 2019 se genera la mayor radiación en el mes de **abril** con **864.77 W/m²**.

Radiación Media Mensual 2019

RADIACIÓN MEDIA MENSUAL 2019 (Wh/m ²)	
Enero	801.29
Febrero	825.68
Marzo	828.29
Abril	864.77
Mayo	808.10
Junio	768.00
Julio	782.24
Agosto	813.26
Septiembre	838.40
Octubre	803.19
Noviembre	741.00
Diciembre	783.61

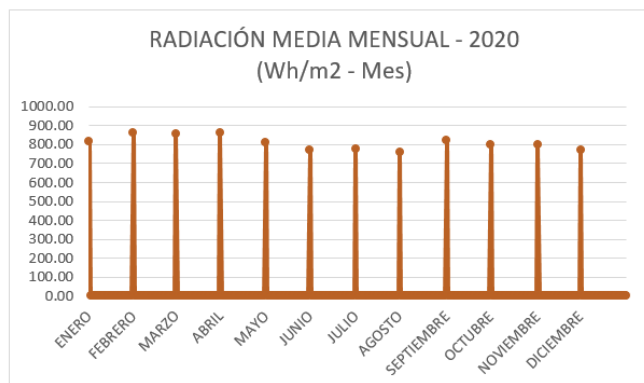


Adaptado de IDEAM (2022).

Para el año 2020 se genera la mayor radiación en el mes de **febrero** con **864.07 W/m²**.

Radiación Media Mensual 2020

RADIACIÓN MEDIA MENSUAL 2020 (Wh/m ²)	
Enero	817.61
Febrero	864.07
Marzo	856.84
Abril	863.70
Mayo	811.42
Junio	773.23
Julio	775.10
Agosto	759.61
Septiembre	820.13
Octubre	800.32
Noviembre	801.87
Diciembre	773.58



Adaptado de IDEAM (2022).

La máxima radiación en Bucaramanga mensual anual se presentó en el mes de febrero del año 2017.

Máxima Radiación Mensual Anual 2015-2020

MÁXIMA RADIACIÓN MENSUAL ANUAL (Wh/m ²)		
2015	Marzo	880.81
2016	Agosto	843.45
2017	Febrero	888.64
2018	Septiembre	864.77
2019	Abril	864.77
2020	Febrero	864.07

Adaptado de IDEAM (2022).

Radiación Mensual Media Anual 2015-2020

RADIACIÓN MENSUAL MEDIA ANUAL 2015-2020 (Wh/m²)	
Enero	808.24
Febrero	847.18
Marzo	796.44
Abril	845.51
Mayo	799.11
Junio	771.46
Julio	773.84
Agosto	810.10
Septiembre	839.24
Octubre	816.99
Noviembre	760.21
Diciembre	778.74

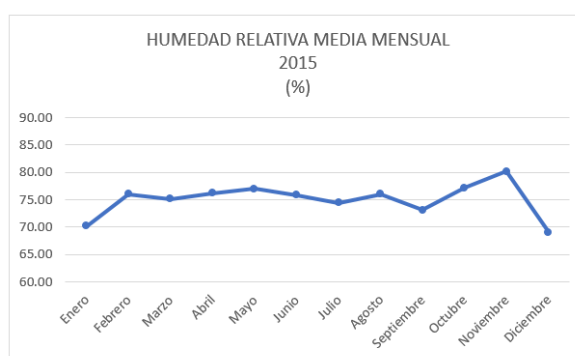
Adaptado de IDEAM (2022).

Apéndice C. Humedad relativa 2015-2020

La humedad relativa de Bucaramanga varía entre un 65% y un 87% de acuerdo con la información suministrada en los metadatos tabulados. Para el análisis de las imágenes satelitales es necesario ubicar la humedad relativa para el día de toma de las imágenes, así como para llegar a una conclusión objetiva de las islas de calor es oportuno revisar el comportamiento mensual anual desde el 2015 hasta el 2020.

Humedad Relativa Media Mensual 2015

HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL 2015 (%)	
Enero	70.26
Febrero	76.04
Marzo	75.15
Abril	76.19
Mayo	77.01
Junio	75.88
Julio	74.44
Agosto	76.00
Septiembre	73.14
Octubre	77.14
Noviembre	80.17
Diciembre	69.10

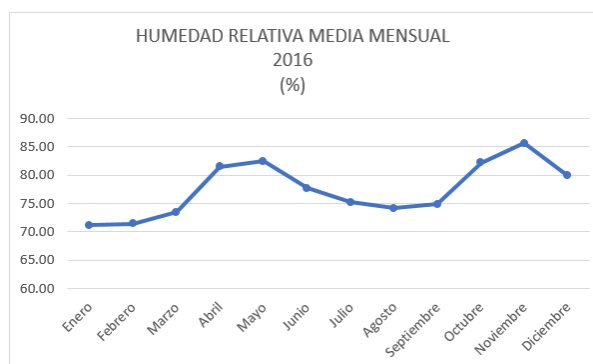


Adaptado de IDEAM (2022).

El comportamiento de la humedad para el 2015, es decreciente en el mes de enero, septiembre y diciembre, con un alto porcentaje de humedad de **80.17%** en el mes de **noviembre**.

Humedad Relativa Media Mensual 2016

HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL 2016 (%)	
Enero	71.19
Febrero	71.42
Marzo	73.51
Abril	81.47
Mayo	82.50
Junio	77.76
Julio	75.27
Agosto	74.19
Septiembre	74.91
Octubre	82.24
Noviembre	85.66
Diciembre	79.91



Adaptado de IDEAM (2022).

El comportamiento de la humedad relativa para el 2016, presenta un porcentaje bajo hacia los meses de enero, febrero, marzo y julio, agosto y septiembre; con un alto porcentaje de humedad de **85.66%** en el mes de **noviembre**.

Humedad Relativa Media Mensual 2017

HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL 2017 (%)	
Enero	73.33
Febrero	64.29
Marzo	82.45
Abril	79.70
Mayo	83.62
Junio	84.07
Julio	83.18
Agosto	79.36
Septiembre	81.25
Octubre	83.43
Noviembre	87.34
Diciembre	79.03

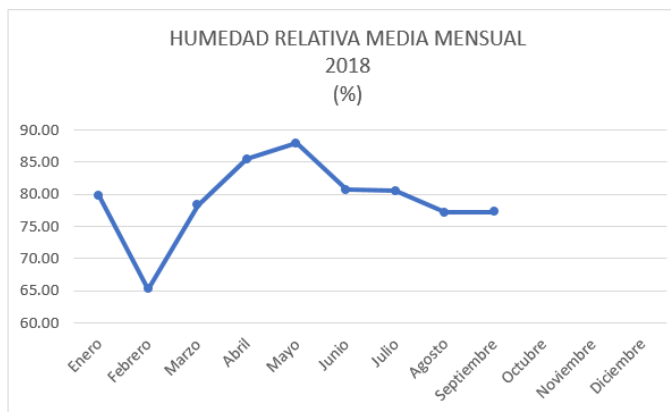


Adaptado de IDEAM (2022).

El comportamiento de la humedad relativa para el 2017, presenta un porcentaje muy bajo hacia el mes de **febrero** con **64.29%** y un alto porcentaje de humedad de **87.34%** en el mes de **noviembre**.

Humedad Relativa Media Mensual 2018

HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL 2018 (%)	
Enero	79.78
Febrero	65.27
Marzo	78.34
Abril	85.49
Mayo	87.99
Junio	80.70
Julio	80.53
Agosto	77.19
Septiembre	77.30
Octubre	-
Noviembre	-
Diciembre	-

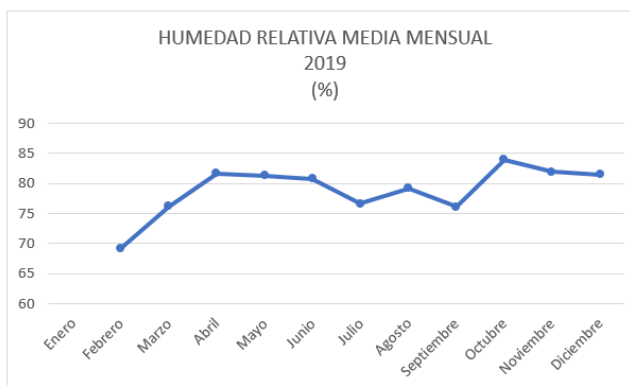


Adaptado de IDEAM (2022). Nota: los datos correspondientes a los meses de octubre, noviembre y diciembre no evidencian registro en la *metadata* del IDEAM.

Para el 2018, el mayor porcentaje de humedad se da en el mes de **mayo** con **87.99%**, sin embargo, se resalta el hecho que los metadatos para los meses de octubre, noviembre y diciembre no se registran en la base documental obtenida del IDEAM.

Humedad Relativa Media Mensual 2019

HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL 2019 (%)	
Enero	-
Febrero	69.24
Marzo	76.23
Abril	81.69
Mayo	81.30
Junio	80.38
Julio	76.62
Agosto	79.19
Septiembre	76.11
Octubre	83.96
Noviembre	81.98
Diciembre	81.52

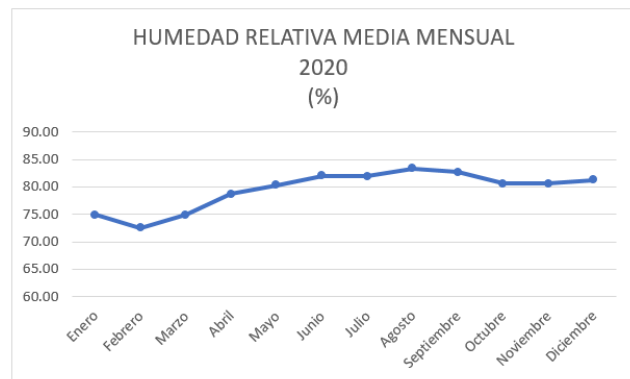


Adaptado de IDEAM (2022). Nota: los datos correspondientes al mes de enero no evidencian registro en la *metadata* del IDEAM.

Para el 2019, el mayor porcentaje de humedad se da en el mes de **octubre** con **83.96%**, sin embargo, para el mes previo de **septiembre** se percibe como en **febrero** un porcentaje muy bajo de humedad sobre el **76%**.

Humedad Relativa Media Mensual 2020

HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL 2020 (%)	
Enero	74.89
Febrero	72.49
Marzo	74.89
Abril	78.71
Mayo	80.34
Junio	82.06
Julio	81.91
Agosto	83.38
Septiembre	82.67
Octubre	80.59
Noviembre	80.59
Diciembre	81.27



Adaptado de IDEAM (2022).

En el 2020, **febrero** presenta el mes con menor porcentaje de humedad con **72.49%** y la tendencia en el porcentaje de humedad se mantiene sobre el 80% para los meses posteriores.

Humedad Relativa Media Anual 2015-2020

HUMEDAD RELATIVA MEDIA ANUAL 2015-2020 (%)	
2015	75.02
2016	77.58
2017	80.18
2018	79.85
2019	79.49
2020	79.80

Adaptado de IDEAM (2022). Nota: Los datos del año 2018, contienen únicamente de enero a septiembre. Los datos del año 2019 no contienen enero en la *metadata* suministrada por el IDEAM.

La media anual por año desde el 2015 hasta el 2020, demuestra una fluctuación entre el 75 y el 80%, siendo el 2017 el año con mayor porcentaje de humedad relativa.

Humedad Relativa Media Mensual Anual 2015-2020

HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL ANUAL 2015-2020 (%)	
Enero	73.89
Febrero	69.79
Marzo	76.76
Abril	80.54
Mayo	82.12
Junio	80.22
Julio	78.66
Agosto	78.22
Septiembre	77.56
Octubre	81.47
Noviembre	83.15
Diciembre	78.17

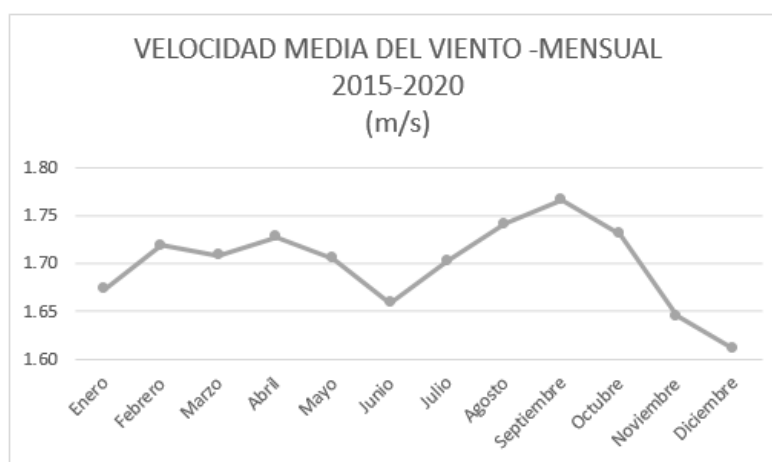
Adaptado de IDEAM (2022).

Apéndice D. Vientos 2015-2020

La velocidad de los vientos en Bucaramanga entre el año 2015 y 2020. La velocidad media en los meses de julio, agosto y septiembre tienen un incremento hasta 1.77 m/s y en diciembre la curva decae a 1.61 m/s

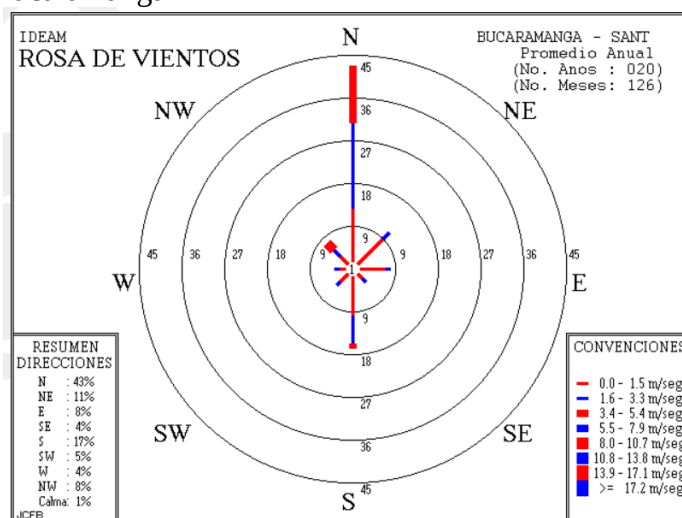
Velocidad Media del Viento Mensual 2015-2020

VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO MENSUAL 2015-2020 (%)	
Enero	1.67
Febrero	1.72
Marzo	1.71
Abril	1.73
Mayo	1.71
Junio	1.66
Julio	1.70
Agosto	1.74
Septiembre	1.77
Octubre	1.73
Noviembre	1.65
Diciembre	1.61



Adaptado de IDEAM (2022).

Rosa de los Vientos Bucaramanga



Tomado de (IDEAM, s.f.b)

Apéndice E. Geoprocesamiento de imágenes Landsat

Para el descargue de imágenes y geoprocesamiento es indispensable tomar los datos de días con mayor radiación, temperatura y humedad relativa desde el 2015 al 2020; la humedad relativa, día juliano e inclinación del sol que aparecen en los metadatos tabulados del IDEAM y desde cada Geotiff descargado del paquete de imágenes Landsat 8 son necesarios para el procesamiento total (Ver compilado general de 2013 al 2022).

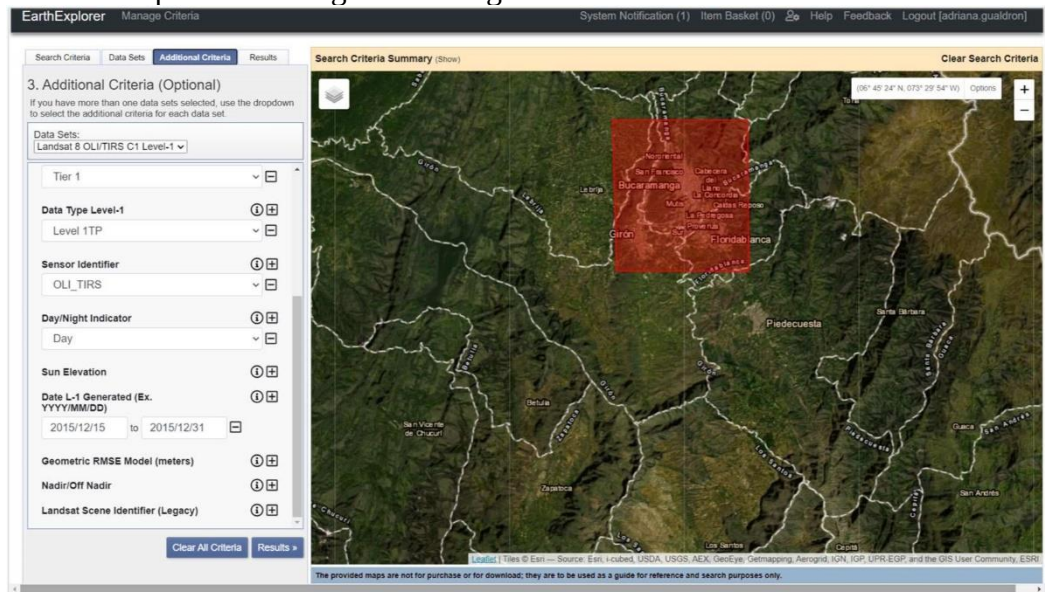
Compilado general para geoprocesamiento de imágenes Landsat 8 del 2013 al 2022

DATOS PARA GEOPROCESAMIENTO DE IMÁGENES LANDSAT BUCARAMANGA - COLOMBIA										
DESCRIPCIÓN	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
LATITUD	7.160277	7.160277	7.09999722	7.09999722	7.09999722	7.09999722	7.09999722	7.09999722	7.09999722	7.09999722
LONGITUD	-73.093	-73.093	-73.11	-73.11	-73.11	-73.11	-73.11	-73.11	-73.11	-73.11
ALTITUD (Km)	0.959	0.959	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
HUMEDAD RELATIVA (%)	76.26	75.00	75.02	77.58	80.18	79.85	79.49	79.80	84.00	68
TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)	20.77	21.23	23.96	23.82	23.3	23.44	23.85	23.7	26	27
PRESIÓN ATMOSFÉRICA (mb)	904	904	902	904	904	904	904	904	904	904
IMAGEN LANDSAT										
IMAGEN ADQUIRIDA	D 2013-07-25	D 2014-01-01	D 2015-03-09	D 2016-03-11	D 2017-04-15	D 2018-02-13	D 2019-02-25	D 2020-02-03	D 2021-11-13	D 2022-02-24
HORA DE TOMA	"15:13:55.58000202""15:13:20.42546102"	"15:11:36.63740502"	"15:11:48.42880002"	"15:11:24.16136902"	"15:11:46.04484592""15:05:28.25197702""15:12:01.19122602""15:06:07.88035502""15:11:58.70498902"					
DÍA JULIANO	206	1	68	71	105	44	56	34	317	55
ELEVACIÓN DEL SOL	61.07404492	50.24229285	59.16740636	59.76631178	64.16654769	54.31346951	56.67194598	52.53049639	56.714397	56.58242777
RADIANCIA MULTIBANDA										
BANDA 10	3.34E-04	3.34E-04	3.34E-04	3.34E-04	3.34E-04	3.34E-04	3.34E-04	3.34E-04	3.34E-04	3.34E-04
BANDA 4	9.69E-03	1.03E-02	1.01E-02	1.01E-02	9.92E-03	1.02E-02	1.02E-02	1.03E-02	1.02E-02	1.02E-02
BANDA 5	5.93E-03	6.32E-03	6.20E-03	6.19E-03	6.07E-03	6.27E-03	6.24E-03	6.29E-03	6.24E-03	6.24E-03
BANDA 3	1.15E-02	1.23E-02	1.20E-02	1.20E-02	9.60E+01	1.22E-02	1.21E-02	1.22E-02	1.21E-02	1.21E-02
RADIANCIA ADITIVA										
BANDA 10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
BANDA 4	-48.42642	-51.65979	-50.67892	-5.06E+01	-49.61829	-51.23186	-50.98258	-51.42857	-51.01758	-51.0019
BANDA 5	-29.63455	-31.61321	-31.01297	-30.96377	-30.36392	-31.35134	-31.1988	-31.47172	-31.22021	-31.21062
BANDA 3	-57.42787	-61.26226	-60.09907	-60.00372	-58.84129	-60.75479	-60.45917	-60.98807	-60.50068	-60.48208
REFLECTANCIA (cuadro)										
BANDA 4	1603	1603	1603	1603	1603	1603	1603	1603	1603	1603
BANDA 5	972.6	972.6	972.6	972.6	972.6	972.6	972.6	972.6	972.6	972.6
TOA SEGÚN TABLA										
CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA SEGÚN CÁLCULO (W/m²/sr/um)										
DRAD	5.34	4.91	5.18	5.11	5.48	4.42	3.53	4.36	5.95	5.76
ULRAD	3.49	3.21	3.39	3.34	3.61	2.83	2.2	2.8	3.99	3.81
CONSTANTES BANDA 10										
K1	774.8853	774.8853	774.8853	774.8853	774.8853	774.8853	774.8853	774.8853	774.8853	774.8853
K2	1321.0789	1321.0789	1321.0789	1321.0789	1321.0789	1321.0789	1321.0789	1321.0789	1321.0789	1321.0789
DATOS PARA EL DÍA - OBTENIDOS DEL IDEAM										
TEMPERATURA DÍA IMG SATELITAL -To (°C)	24.41	24	25.96	25.98	23.73	24.083	25.108	24.45	26	27
HUMEDAD RELATIVA DÍA IMG SATELITAL (%)	71.48	75	65.23	61.19	78.56	70.46	54.40	72.90	84.00	68

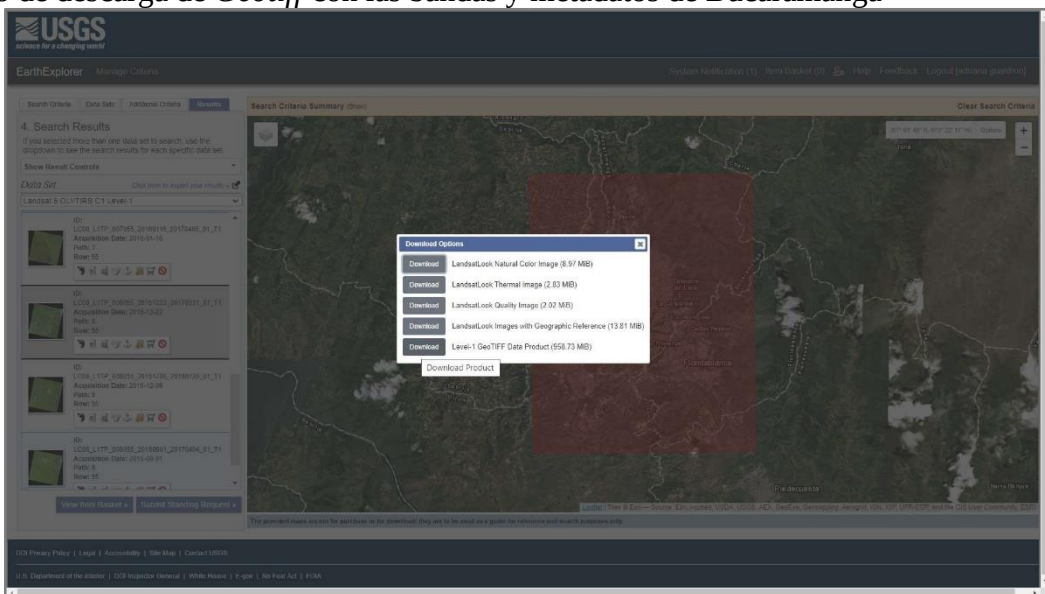
Adaptado de IDEAM (2022) y (U.S. Geological Survey, s.f.).

La descarga de imágenes satelitales de Landsat 8 se realiza directamente en la página del servicio geológico de Estados Unidos - (*United States Geological Survey*) – USGS, previo registro, donde se revisan por medio de un polígono el área objeto de estudio, identificando las imágenes con nubosidad entre el 0 y el 30% para la zona y el satélite requerido para la obtención de la imagen, en el caso del estudio, con sensor OLI-TIRS.

Ubicación de zona para la descarga de la imagen satelital



Tomado de (U.S. Geological Survey, s.f.).

Proceso de descarga de *Geotiff* con las bandas y metadatos de Bucaramanga

Tomado de (U.S. Geological Survey, s.f.).

Cada imagen tiene una codificación que describe el satélite, tipo de sensor, el nivel de procesamiento, el año de adquisición, la versión entre otros como se aprecia en la. Para el estudio en particular se tomaron imágenes de la versión T1 – L1 que son de procesamiento y calidad más

alta.

Codificación de imágenes satelitales

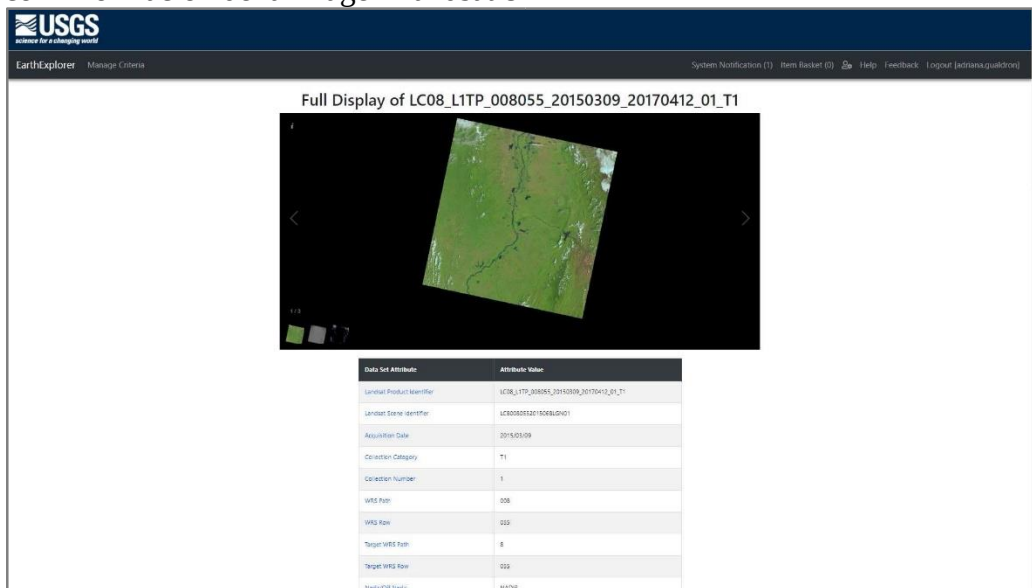
LC08_L1TP_007055_20210926_20211001_02_T1_B3



 Satélite /Sensor/Landsat 8-OLI-TIRS	 Año, mes y día de procesamiento
 Nivel de procesamiento /L1	 Identificador de estación terrestre
 Sistema de referencia mundial	 Versión
 Año, mes y día de toma de la imagen	 Banda

Elaboración a partir de las convenciones de *U.S. Geological Survey* (s.f.)

Geotiff con información de la imagen Landsat 8

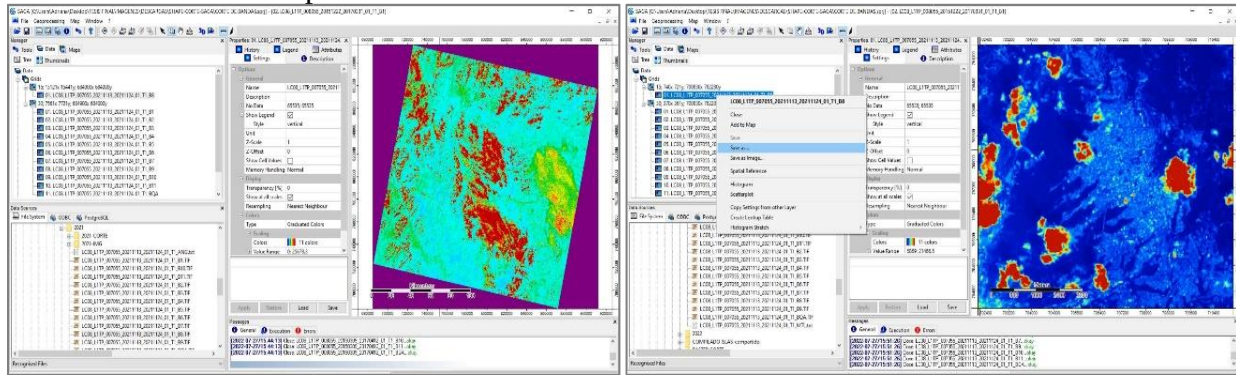


Info Set Attribute	Attribute Value
Landsat Product Identifier	LC08_L1TP_007055_20210926_20211001_02_T1
Landsat Scene Identifier	LC0808055261008L2001
Acquisition Date	20210926
Collection Category	T1
Collection Number	1
WRS Path	008
WRS Row	025
Target WRS Path	8
Target WRS Row	025
Product ID	00000000000000000000

Tomado de (U.S. Geological Survey, s.f.).

Una vez descargado el archivo comprimido de bandas con metadatos se procede a cortar la zona objeto de estudio a partir de un ráster. Para el estudio se realizó el corte ráster en el software SAGA a través de la creación de un polígono desde un archivo SHAPEFILE.

Proceso de corte ráster por bandas

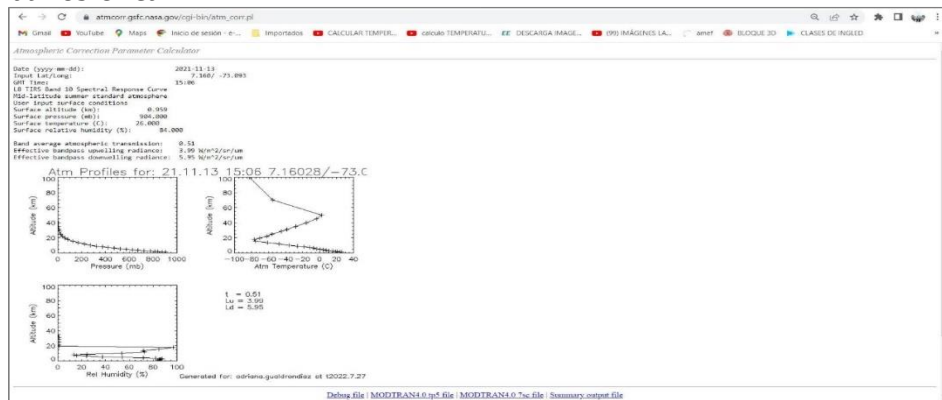


Nota: elaboración a partir de SAGA software.

El corte ráster se guardó en la extensión que por defecto maneja SAGA: .sgrd, a fin de geoprocesarla con programación R en *RStudio*.

Para el análisis de las imágenes dentro de *RStudio* y la obtención por programación de la temperatura de superficie, fue indispensable realizar en la página de la nasa la corrección atmosférica de la imagen con los metadatos del *Geotiff* descargados.

Corrección atmosférica



Nota: corrección atmosférica tomada de la página oficial de la NASA (2013).

Desde *RStudio* se trabajaron las bandas 3, 4, 5 y 10 a partir de las cuales se calculó la reflectancia – TOA, la temperatura de brillo, el índice normalizado de vegetación – NVDI y la temperatura de superficie mediante la combinación de las bandas.

Cada banda tiene una resolución de 100 a 15 metros con una especificación de captura de datos por píxel con su respectivo código RGB, que permitió detectar información relevante para estudios del territorio, en este caso particular Bucaramanga.

Resolución de bandas espectrales para Landsat 7 y Landsat 8

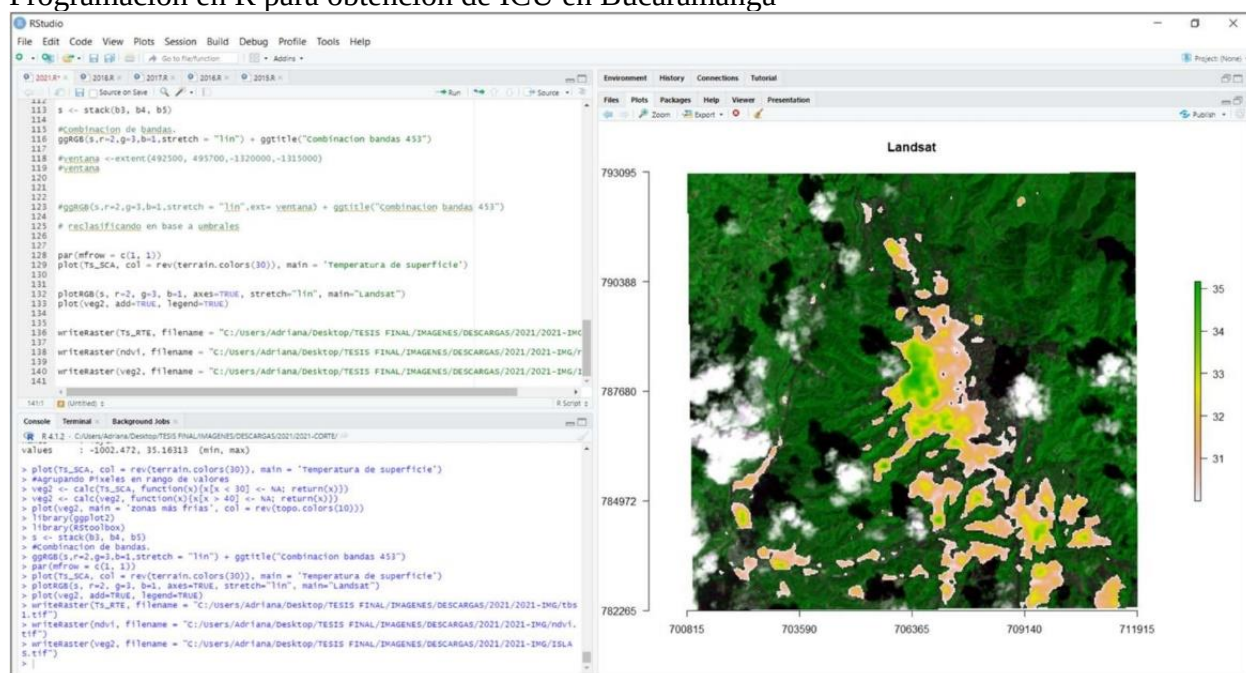
Landsat-7 ETM+ Bands (μm)			Landsat-8 OLI and TIRS Bands (μm)		
			30 m Coastal/Aerosol	0.435 - 0.451	Band 1
Band 1	30 m Blue	0.441 - 0.514	30 m Blue	0.452 - 0.512	Band 2
Band 2	30 m Green	0.519 - 0.601	30 m Green	0.533 - 0.590	Band 3
Band 3	30 m Red	0.631 - 0.692	30 m Red	0.636 - 0.673	Band 4
Band 4	30 m NIR	0.772 - 0.898	30 m NIR	0.851 - 0.879	Band 5
Band 5	30 m SWIR-1	1.547 - 1.749	30 m SWIR-1	1.566 - 1.651	Band 6
Band 6	60 m TIR	10.31 - 12.36	100 m TIR-1	10.60 - 11.19	Band 10
			100 m TIR-2	11.50 - 12.51	Band 11
Band 7	30 m SWIR-2	2.064 - 2.345	30 m SWIR-2	2.107 - 2.294	Band 7
Band 8	15 m Pan	0.515 - 0.896	15 m Pan	0.503 - 0.676	Band 8
			30 m Cirrus	1.363 - 1.384	Band 9

Tomado de NASA (2013)

A partir de la metodología de trabajo en R del profesor Jhonatan Aponte Saravia³ se calculó año por año desde el 2015 al 2020, la temperatura de superficie, el índice de cobertura vegetal y la transferencia Radiativa para Bucaramanga, de allí se obtuvieron 3 archivos de imágenes por año con extensión .tif para el análisis en SIG (Sistema de Información Geográfica).

³ Docente investigador. Ingeniero Forestal de la Universidad Nacional del Centro del Perú, Magister en Geomática de la Universidad Nacional de Colombia.

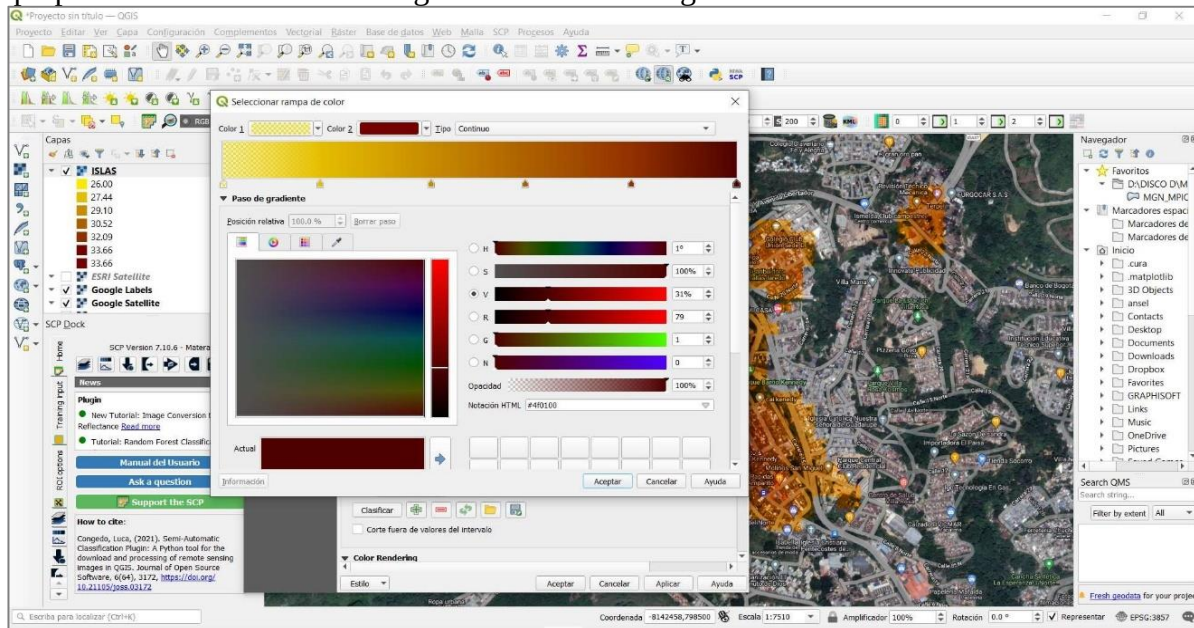
Programación en R para obtención de ICU en Bucaramanga



Nota: elaboración a partir de *R-Studio software*.

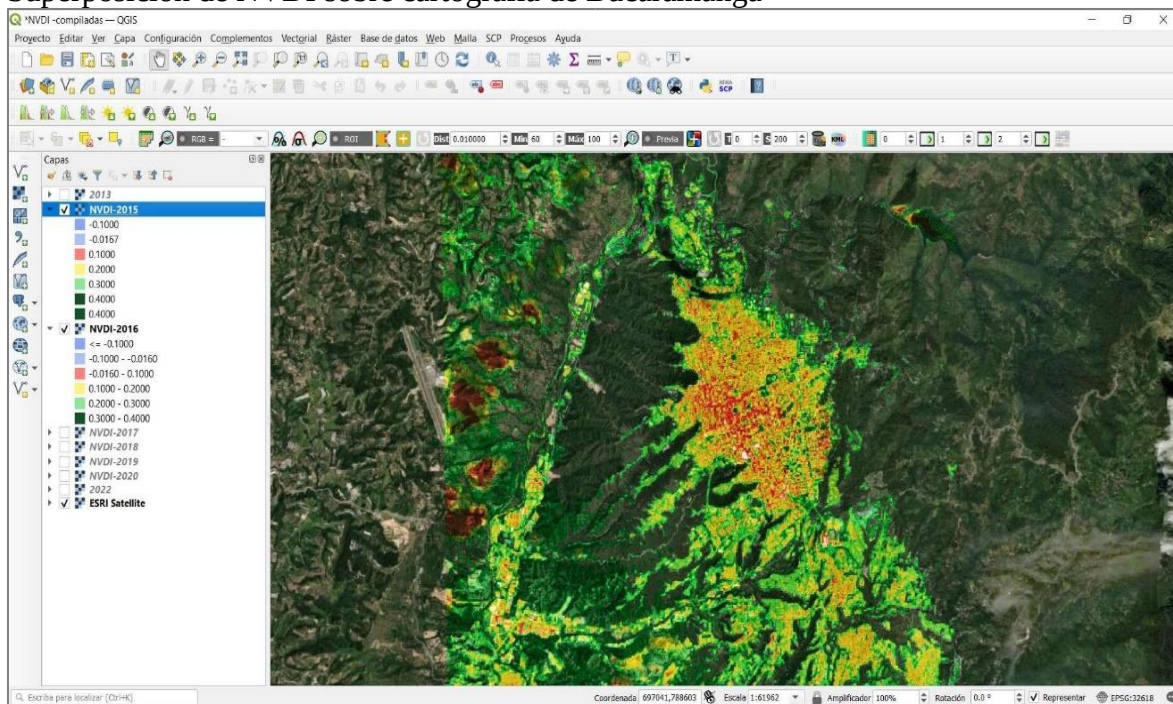
Finalmente, cada imagen por año fue dispuesta sobre cartografía del territorio objeto de estudio. Las imágenes fueron adaptadas con rampas de color desde QGIS para identificar claramente el rango de temperaturas máximas en cada comuna de la ciudad, la cobertura natural del terreno y las zonas con mayor radiación.

Superposición de ICU sobre cartografía de Bucaramanga



Nota: elaboración a partir de *Q-Gis software*.

Superposición de NVDI sobre cartografía de Bucaramanga



Nota: elaboración a partir de *Q-Gis software*.

Apéndice F. Preselección de publicaciones

Número	Año de publicación	Autor(es)	Título	Palabras claves de la publicación	País	Tipo
1	2016	Cabrera, H., Marcano, A. y Castellanos, Y. (2006)	Absorption coefficient of nearly transparent liquids measured using thermal lens spectrometry	Thermal lens, absorption coefficient, transparent liquids, thermal diffusivity	Cuba	Artículo
2	2016	Quinta-Ferreira, M., Dias, J. F., & Alija, S (2016).	False low water content in road field compaction control using nuclear gauges - a case study	Quality Control Low water content Road fill SMDG Mineralogy	Portugal	Artículo
3	2015	Nakano, A. (2015)	Urban Climate Generator User Interface Development: Towards a Usable Tool to Integrate the Urban Heat Island Effect into the Urban Design Process	MIT Trabajo doctoral	Estados Unidos	Trabajo de doctorado
4	2016	Godbole, S. y Bhargava, R. (2016)	Understanding the factors contributing in the formation of 111 canopy level urban heat island - a case study of Nagpur city	Urban heat island, canopy layer, vegetation, height-width ratio, materials	India	Publicación académica
5	2016	Bani Baker, M., Abende, R., Abu-Salem, Z. y Khedaywi, T. (2016)	Production of Sustainable Asphalt Mixes Using Recycled Polystyrene	Polystyrene; Bitumen; Sustainability; Recycling	India	Artículo
6	2016	Kakoniti, A., Georgiou, G., Marakkos, K., Kumar, P. y Neophytou, M. K. A. (2016)	The role of materials selection in the urban heat island effect in dry midlatitude climates	Heat transfer, urban microclimate, urban design, building design, road design, FD Rans simulations	Reino Unido	Artículo
7	2016	Wang, Y., Berardi, U. y Akbari, H. (2016)	Comparing the effects of Urban Heat Island Mitigation Strategies for Toronto, Canada	Urban heat island, microclimate simulation, urban surface albedo, cool roof, urban vegetation	Canadá	Artículo
8	2010	Chen, M., Xu, G., Wu, S., & Zheng, S. (2010)	High-temperature hazards and prevention measurements for asphalt pavement	Asphalt pavement; high-temperature rutting; traffic safety; urban heat island effect; phase change materials	China	Artículo
9	2017	El-Hassan, H. y Kianmehr, P. (2017)	Sustainability assessment and physical characterization of pervious concrete pavement made with GGBS		Arabia	Publicación académica
10	2017	Sánchez Sánchez, C., Nuñez Peiró, M. y Neila González, F. J. (2017)	Isla de calor urbana y población vulnerable. El caso de Madrid	Isla de calor urbana; indicadores urbanos; población vulnerable; ola de calor; pobreza energética.	España	Publicación académica
11	2018	Duan, H., Chen, R., Zheng, Y., & Xu, C. (2018)	Photothermal properties of plasmonic nanoshell-blended nanofluid for direct solar thermal absorption	Photothermal, nanoshell, thermal absorption	China	Artículo

Número	Año de publicación	Autor(es)	Título	Palabras claves de la publicación	País	Tipo
12	2017	Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017)	The Urban Heat Island Effect, its Causes, and Mitigation, with Reference to the Thermal Properties of Asphalt Concrete	Urban heat island; asphalt concrete; urban heat island causes; urban heat island consequences; urban heat island mitigation measures	Australia	Artículo
13	2018	Simón Grau, J. y López Ayerra, J. (2018)	Pavimentos reflectantes para la mitigación del cambio climático	Pavimento asfáltico urbano, pavimento frío, reflectancia solar, cambio climático, isla de calor urbana, albedo	España	Artículo
14	2018	Shooshtarian S., Rajagopalan P. y Sagoo A. (2018)	A comprehensive review of thermal adaptive strategies in outdoor spaces	Thermal comfort, mitigation strategies, guidelines, outdoor activities, urban configurations	Australia	Artículo
15	2018	Guo, Y., Gasparrini, A., Li, S., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A. M., de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, M., ... y Tong, S. (2018)	Quantifying excess deaths related to heatwaves under climate change scenarios: A multicountry time series modelling study	Heatwaves, climate change, multicountry modeling,	Estados Unidos	Artículo
16	2019	Chatterjee, S., Khan, A., Dinda, A., Mithun, S., Khatun, R., Akbari, H., ... y Wang, Y. (2019)	Simulating micro-scale thermal interactions in different building environments for mitigating urban heat islands	Urban micro-climate ICU mitigation strategies ENVI-met V 4.0	India	Artículo
17	2019	Arnell, N. W., Lowe, J. A., Bernie, D., Nicholls, R. J., Brown, S., Challinor, A. J. y Osborn, T. J. (2019)	The global and regional impacts of climate change under representative concentration pathway forcing and shared socioeconomic pathway socioeconomic scenarios	climate change, hazard, drought, flood, heatwave, agricultural impacts, Scenario MIP	Reino Unido	Artículo
18	2019	Papadimitriou, C. N., Psomopoulos, C. S. y Kehagia, F. (2019)	A review on the latest trend of Solar Pavements in Urban Environment	Renewables, Distributed Generation, Solar Pavements	Grecia	Artículo
19	2019	Xu, H. J., Xing, Z. B., Wang, F. Q. y Cheng, Z. M. (2019)	Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nanofluids in porous media: Fundamentals and applications	Nanofluid, porous media, heat transfer, convection, thermal radiation, phase change	Estados Unidos	Artículo
20	2019	Yu, Z., Yao, Y., Yang, G., Wang, X. y Vejre, H. (2019)	Strong contribution of rapid urbanization and urban agglomeration development to regional thermal environment dynamics and evolution	Rapid urbanization, land cover conversion, regional thermal environment, dynamic and evolution, climate adaption and mitigation, environmental, Kuznets curve	China	Artículo
21	2020	Murana, A. A., Akilu, K. y Olowosulu, A. T. (2020)	Use of expanded polystyrene from disposable food pack as	Bitumen, Disposable Food Pack, Expanded Polystyrene, Hot Mix Asphalt, Modified bitumen	Nigeria	Artículo

Número	Año de publicación	Autor(es)	Título	Palabras claves de la publicación	País	Tipo
22	2020	Berquist, Z. J., Turaczy, K. K. y Lenert, A. (2020)	a modifier for bitumen in hot mix asphalt Plasmon-Enhanced Greenhouse Selectivity for High Temperature Solar Thermal Energy Conversion	Aerogel, infrared, plasmonic, concentrated solar power, selective absorber	Estados Unidos	Artículo
23	2020	Amini, N. y Hayati, P. (2020)	Effects of CuO nanoparticles as phase change material on chemical, thermal and mechanical properties of asphalt binder and mixture	Phase Change Material Asphalt Binder Energy storage CuO FTIR	Irán	Artículo
24	2020	Gao, Y. (2020)	Assessing the relationship between urban structure and the urban heat island: improving local climate zone mapping and estimating zonal and sub-zonal scale effects on air temperature	Urban structure, urban heat island, local climate, air temperature	Estados Unidos	Trabajo de Doctorado
25	2020	Xiao, Dou y Xue, Chen. (2020)	Strategies for coastal Cities to Cope with Flood disaster and Urban Heat Island Effect in the Context of climate Change	Climate Change, urban heat island, city waterlogging, sponge city, low impact development	China	Trabajo de maestría
26	2020	Yusputri, R. M., Saleh, S. M. y Isya, M (2020)	The effect of wood ash and styrofoam on the characteristics of AC-WC mixture	Wood ash, AC-WC mixture	Indonesia	Artículo
27	2020	Antoniadis, D., Katsoulas, N., & Papanastasiou, D. K. (2020)	Thermal environment of urban schoolyards: current and future design with respect to children's thermal comfort	Urban area; children; schoolyard; design; microclimate; human thermal comfort; thermal perception; vegetation; cooling impact; greening schoolyards	Grecia	Artículo
28	2021	Salami Magar, D., Salami Magar, R. K. y Chidi, C. L. (2021)	Assessment of urban heat island in Kathmandu valley	Ecological condition; land surface temperature; urban heat island, urbanization	Nepal	Artículo
29	2020	Huang, J. M. y Chen, L. C. (2020)	A Numerical Study on Mitigation Strategies of Urban Heat Islands in a Tropical Megacity: A Case Study in Kaohsiung City, Taiwan	Urban heat island (ICU); permeable pavement; greening; Envi-met; block-scale	Taiwan	Artículo
30	2020	Ordóñez Martín, M. y Gómez de Cózar, J. C. (2020)	Coberturas sostenibles en excavaciones arqueológicas: metodología de aplicación al caso de mosaicos en el Conjunto Arqueológico de Itálica (Santiponce, Sevilla)	Sostenibilidad, conservación preventiva, coberturas activas, excavación arqueológica, diseño paramétrico, control higrotérmico	España	Artículo
31	2020	Salinas Jalca, J. R. (2020)	Plan de áreas verdes con plantas nativas y/o endémicas para mitigación de islas de	Diseño paisajístico, endémico, áreas verdes, islas de calor, regeneración urbana, medio ambiente	Ecuador	Trabajo de maestría

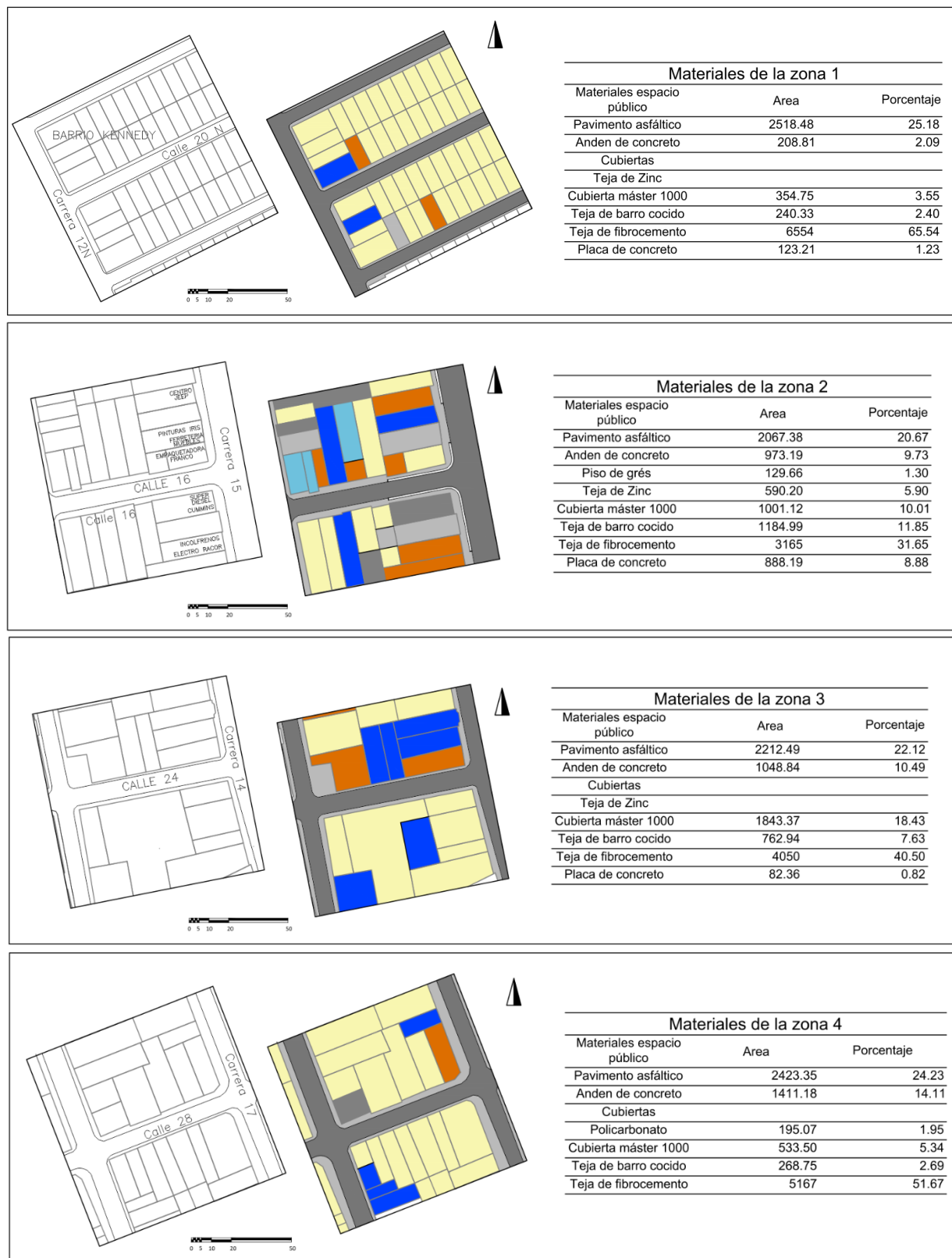
Número	Año de publicación	Autor(es)	Título	Palabras claves de la publicación	País	Tipo
32	2019	Urrutia del Campo, N. y Neila González, J. (2019)	calor en la parroquia Letamendi, Guayaquil Bioclimática, mediciones ambientales y uso de los espacios urbanos: Evaluación comparativa en la Plaza de Chamberí, Madrid	Confort, microclima, diseño urbano, uso del espacio, isla de calor urbana	España	Artículo
33	2018	Sobstyl, J. M., Emig, T., Abdolhosseini Qomi, M. J., Ulm, F. J. y Pelleng, R. J. M. (2018)	Role of city texture in urban heat islands at nighttime	City texture, urban heat island, nighttime, material	Estados Unidos	Artículo
34	2021	Tarasov, M., Gunbina, A., Yusupov, R., Chekushkin, A., Nagirnaya, D., Lemzyakov, S., ... & Winkler, D. (2021)	Non-Thermal Absorption and Quantum Efficiency of SINIS Bolometer	Bolometers, nanoelectronics, submillimeter wave integrated circuits, superconducting microwave devices.	Rusia	Artículo
35	2021	Dhir, K. (2021)	Evaluation of urban heat island effect in cybercity, New Delhi using a 3d urban microclimate model: envi-met	Urban heat island, cybercity, New Delhi, microclimate, envi-met	India	Trabajo de maestría
36	2021	Liu, Y., Liu, W., Gao, Q., Huang, Y., Li, P., & Wang, Y. (2021)	Analysis of Heat Absorption and Collection Based on Solid Structures collector	Solar collection, solid structure, heat absorption analysis, collection heat analysis, reflection spectrum	China	Artículo
37	2021	Shams, M. (2021)	Urban Heat Mitigation for Current and Future Conditions: A case study for downtown London ON	Urban climate, urban heat waves, urban heat island mitigation, human thermal comfort, envi-met, building energy performance	Canadá	Publicación académica
38	2021	Gómez Concepción, H., Rojas Márquez, I. y Perén Montero, J. I. (2021)	Una aproximación a los efectos del diseño urbano en el microclima y calidad de espacios urbanos de una ciudad cálida-húmeda: Panamá	Microclima, movilidad Urbana, calidades urbanas, acceso universal	Panamá	Publicación académica
39	2021	Spalierno M. (2021)	Estudio de materiales termocrómicos innovadores. Análisis de mitigación de la isla de calor		Italia	Trabajo de Máster
40	2022	Kalogeropoulos, G., Dimoudi, A., Touboulidis, P. y Zoras S. (2022)	Urban Heat Island and Thermal Comfort Assessment in a Medium-Sized Mediterranean City	Urban heat island, thermal comfort, thermal remote sensing, land surface temperature, questionnaire survey, in situ measurements	Grecia	Artículo

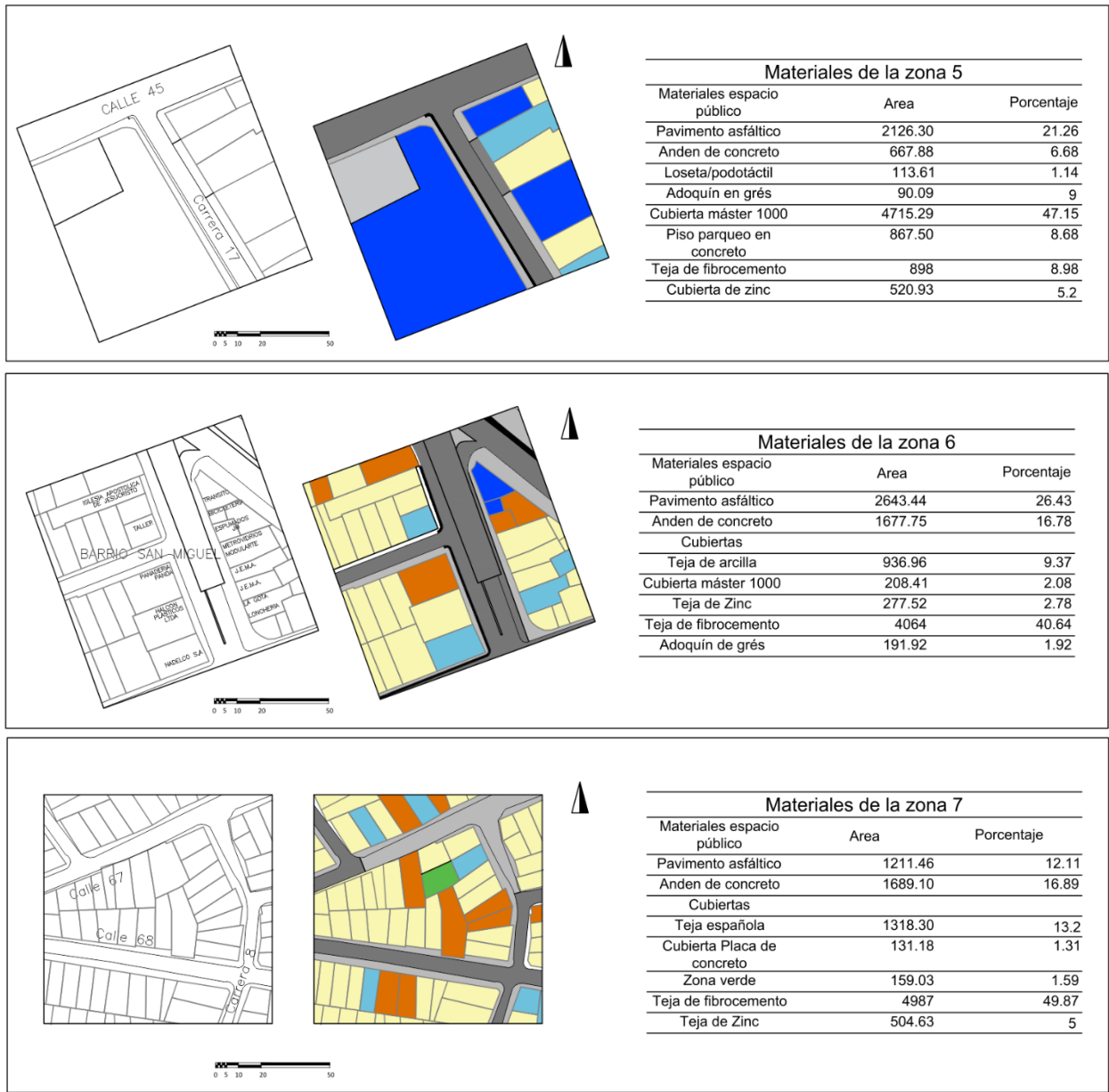
Apéndice G. Evaluación de las publicaciones

Número	Título	Bases	Ampliación	Sustento teórico	Aplicabilidad	Total
1	Absorption coefficient of nearly transparent liquids measured using thermal lens spectrometry	1	0	1	1	3
2	False low water content in road field compaction control using nuclear gauges - a case study	1	0	1	0	2
3	Urban Climate Generator User Interface Development: Towards a Usable Tool to Integrate the Urban Heat Island Effect into the Urban Design Process	1	0	1	1	3
4	Understanding the factors contributing in the formation of 111 canopy level urban heat island - a case study of Nagpur city	1	1	1	1	4
5	Production of Sustainable Asphalt Mixes Using Recycled Polystyrene	1	0	1	1	3
6	The role of materials selection in the urban heat island effect in dry midlatitude climates	1	0	1	1	3
7	Comparing the effects of Urban Heat Island Mitigation Strategies for Toronto, Canada	1	1	1	1	4
8	High-temperature hazards and prevention measurements for asphalt pavement	1	0	1	1	3
9	Sustainability assessment and physical characterization of pervious concrete pavement made with GGBS	1	0	1	1	3
10	Isla de calor urbana y población vulnerable. El caso de Madrid	1	1	1	1	4
11	Photothermal properties of plasmonic nanoshell-blended nanofluid for direct solar thermal absorption	1	0	1	0	2
12	The Urban Heat Island Effect, its Causes, and Mitigation, with Reference to the Thermal Properties of Asphalt Concrete	0	0	1	1	2
13	Pavimentos reflectantes para la mitigación del cambio climático	1	1	1	1	4
14	A comprehensive review of thermal adaptive strategies in outdoor spaces	1	1	1	0	3
15	Quantifying excess deaths related to heatwaves under climate change scenarios: A multicountry time series modelling study	1	1	1	0	3
16	Simulating micro-scale thermal interactions in different building environments for mitigating urban heat islands	1	1	1	1	4
17	The global and regional impacts of climate change under representative concentration pathway forcing and shared socioeconomic pathway socioeconomic scenarios	0	0	1	0	1
18	A review on the latest trend of Solar Pavements in Urban Environment	0	0	1	1	2
19	Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nanofluids in porous media: Fundamentals and applications	0	0	1	0	1
20	Strong contribution of rapid urbanization and urban agglomeration development to regional thermal environment dynamics and evolution	1	1	1	1	4
21	Use of expanded polystyrene from disposable food pack as a modifier for bitumen in hot mix asphalt	1	0	1	0	2
22	Plasmon-Enhanced Greenhouse Selectivity for High Temperature Solar Thermal Energy Conversion	1	1	1	0	3
23	Effects of CuO nanoparticles as phase change material on chemical, thermal and mechanical properties of asphalt binder and mixture	1	0	1	0	2
24	Assessing the relationship between urban structure and the urban heat island: improving local climate zone mapping and estimating zonal and sub-zonal scale effects on air temperature	1	0	1	0	2

Número	Título	Bases	Ampliación	Sustento teórico	Aplicabilidad	Total
25	Strategies for coastal Cities to Cope with Flood disaster and Urban Heat Island Effect in the Context of climate Change	0	0	1	0	1
26	The effect of wood ash and styrofoam on the characteristics of AC-WC mixture	1	0	1	0	2
27	Thermal environment of urban schoolyards: current and future design with respect to children's thermal comfort	0	0	1	0	1
28	Assessment of urban heat island in Kathmandu valley	1	1	1	1	4
29	A Numerical Study on Mitigation Strategies of Urban Heat Islands in a Tropical Megacity: A Case Study in Kaohsiung City, Taiwan	1	1	1	1	4
30	Coberturas sostenibles en excavaciones arqueológicas: metodología de aplicación al caso de mosaicos en el Conjunto Arqueológico de Itálica (Santiponce, Sevilla)	1	0	1	0	2
31	Plan de áreas verdes con planta nativas y/o endémicas para mitigación de islas de calor en la parroquia Letamendi, Guayaquil	1	1	1	0	3
32	Bioclimática, mediciones ambientales y uso de los espacios urbanos: Evaluación comparativa en la Plaza de Chamberí, Madrid	1	1	1	1	4
33	Role of city texture in urban heat islands at nighttime	1	1	1	0	3
34	Non-Thermal Absorption and Quantum Efficiency of SINIS Bolometer	1	0	1	0	2
35	Evaluation of urban heat island effect in cybercity, New Delhi using a 3d urban microclimate model: envi-met	1	1	1	0	3
36	Analysis of Heat Absorption and Collection Based on Solid Structures collector	1	0	1	0	2
37	Urban Heat Mitigation for Current and Future Conditions: A case study for downtown London ON	1	0	1	1	3
38	Una aproximación a los efectos del diseño urbano en el microclima y calidad de espacios urbanos de una ciudad cálida-húmeda: Panamá	1	1	1	1	4
39	Estudio de materiales termocrómicos innovadores. Análisis de mitigación de la isla de calor	1	1	1	1	4
40	Urban Heat Island and Thermal Comfort Assessment in a Medium-Sized Mediterranean City	1	1	1	1	4

Apéndice H. Caracterización de Materiales





Apéndice I. Caracterización de materiales por zonas afectadas por ICU en Bucaramanga

Caracterización de materiales por zonas			
Ubicación	Material	Area	Porcentaje
Zona 1	Pavimento asfáltico	2518.48	25.2
	Andén en concreto	208.81	2.1
	Cubierta de aluminio	354.75	3.5
	Teja de arcilla	240.33	2.4
	Teja de fibrocemento	6554.42	65.5
	Placa de concreto	123.21	1.2
Zona 2	Pavimento asfáltico	2067.38	20.7
	Andén en concreto	973.19	9.7
	Adoquín de grés	129.66	1.3
	Cubierta de aluminio	1001.12	10.0
	Teja de arcilla	1184.99	11.8
	Teja de fibrocemento	3165.27	31.7
	Placa de concreto	888.19	8.9
Zona 3	Teja de Zinc	590.2	5.9
	Pavimento asfáltico	2212.49	22.1
	Andén en concreto	1048.84	10.5
	Cubierta de aluminio	1843.37	18.4
	Teja de arcilla	762.94	7.6
	Teja de fibrocemento	4050	40.5
	Placa de concreto	82.36	0.8
Zona 4	Pavimento asfáltico	2423.35	24.2
	Andén en concreto	1411.18	14.1
	Cubierta de aluminio	533.5	5.3
	Teja de fibrocemento	5436.9	54.4
Zona 5	Cubierta en Policarbonato	195.07	2.0
	Pavimento asfáltico	2126.3	21.3
	Andén en concreto	667.88	6.7
	Andén loseta podotáctil	113.61	1.1
	Adoquín en grés	90.09	0.9
	Cubierta de aluminio	4715.29	47.2
	Teja de fibrocemento	898.4	9.0
	Teja de Zinc	520.93	5.2
Zona 6	Piso parqueo en concreto	867.5	8.7
	Pavimento asfáltico	2643.44	26.4
	Andén en concreto	1677.75	16.8
	Adoquín de grés	191.92	1.9
	Cubierta de aluminio	208.41	2.1
	Teja de arcilla	936.96	9.4
Zona 7	Teja de fibrocemento	4064	40.6
	Teja de Zinc	277.52	2.8
	Pavimento asfáltico	1211.4	12.1
	Andén en concreto	1689.1	16.9
	Teja de arcilla	1318.3	13.2
	Teja de fibrocemento	4987	49.9
	Teja de Zinc	504	5.0
Zona verde privada	Placa de concreto	131.17	1.3
	Zona verde privada	159.03	1.6

Apéndice J. *Imágenes de sobrevuelo con dron zona 2 y zona 3*

Fotografía de la Zona 3: comuna Occidental, manzana entre calle 24 y 25 y carrera 13 y 14



Panorámica sobre la carrera 13: comuna occidental hacia Real de Minas



Escarpa Occidental de Bucaramanga



Nota: se percibe en la comuna occidental la escarpa nor-occidental y la densa vegetación contrastando con las zonas de mayor afectación por ICU

Panorámica de Bucaramanga, realizada desde la comuna occidental hacia los cerros orientales

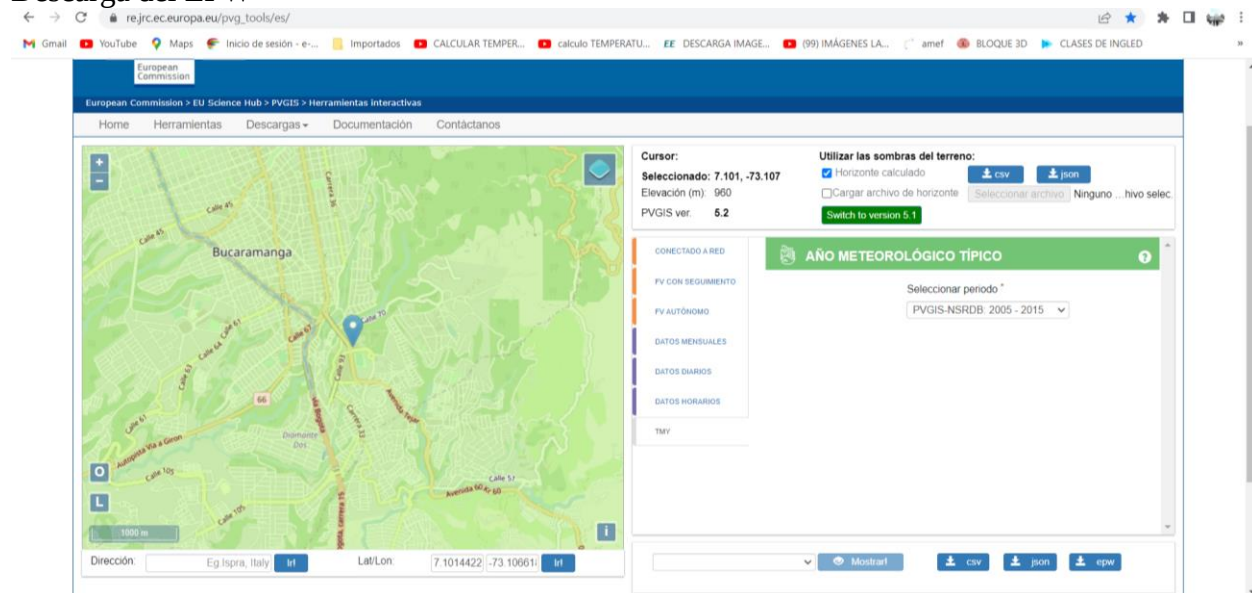


Apéndice K. Análisis Zona 3: máxima afectación por ICU

La valoración de la zona 3 se realizó en *Ecotec* y *Aurora* a fin de corroborar radiaciones máximas en las diferentes superficies horizontales.

Para llevar a cabo el proceso se realizó la conversión de coordenadas de la zona en mención para la posterior descarga del EPW, que correlacionará la información de la zona con los *metadatos* tabulados del IDEAM.

Descarga del EPW

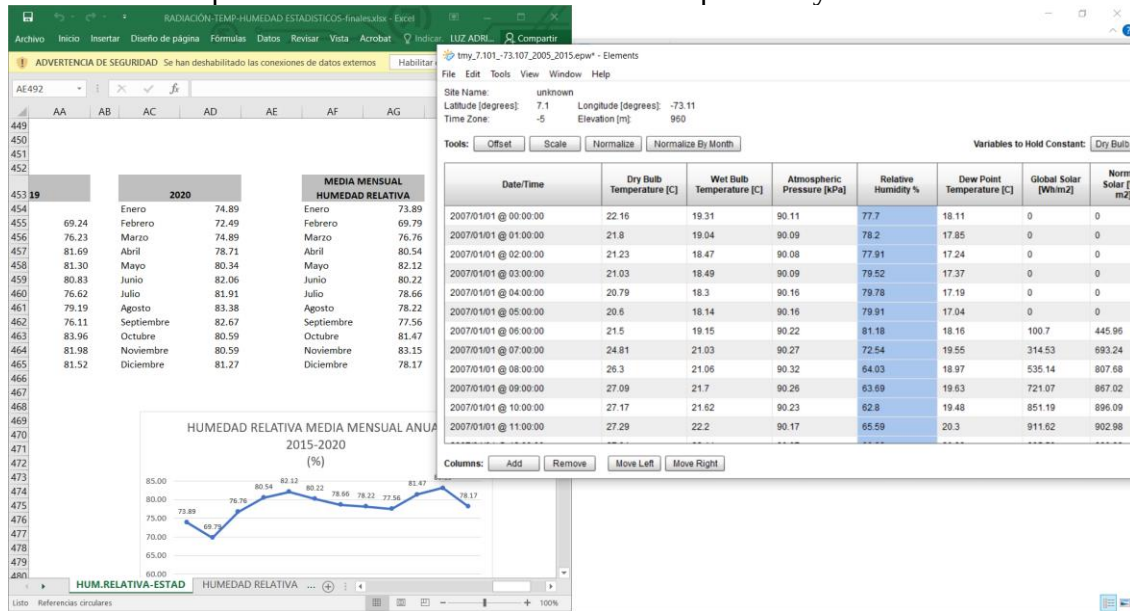


Fuente: descargado de (European Commission, 2022)

Desde la correlación se hicieron correcciones de curva a partir de la normalización; se ajustó la humedad relativa acorde a los datos tabulados del IDEAM para el compilado por meses del 2016 al 2020.

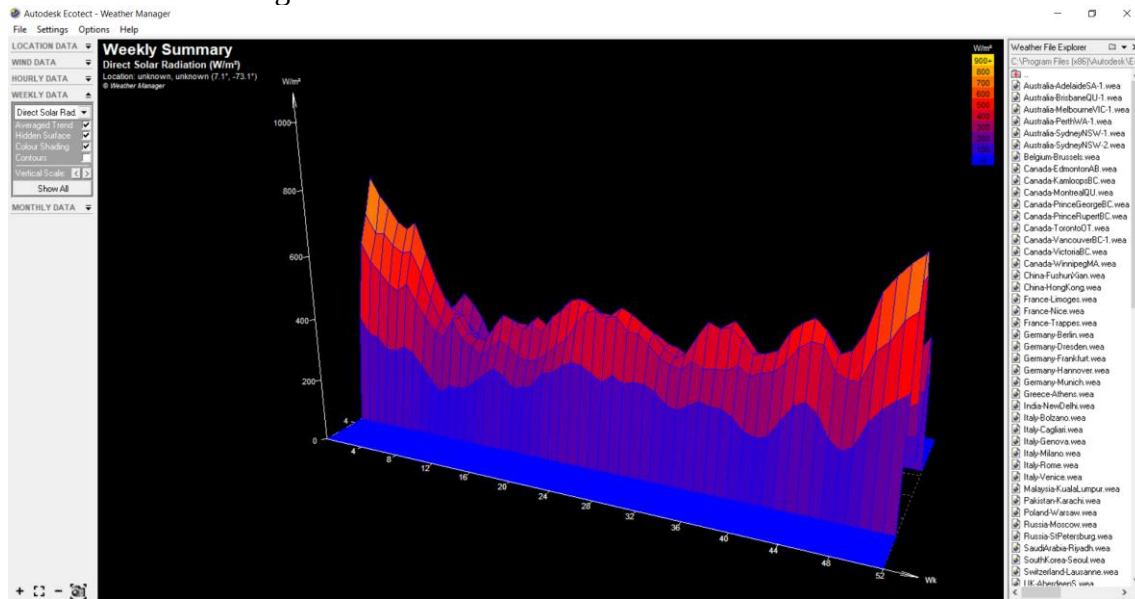
El archivo EPW fue convertido para el análisis en el software ECOTEC, de dónde se obtuvo el archivo WEA que permitió la revisión de radiación y temperatura normalizada.

Corrección de datos para normalización de la curva de temperatura y radiación



Nota: correlación de datos tabulados en Excel y la herramienta *Elements* (Big Ladder Software, 2016)

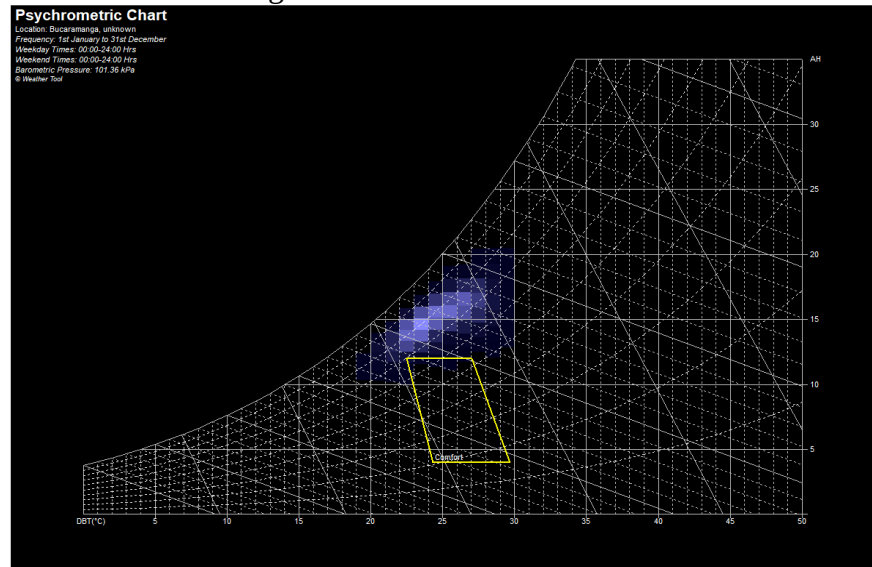
Radiación en Bucaramanga 2015-2020



Fuente: Datos obtenidos en *Ecotect Software* con los datos normalizados

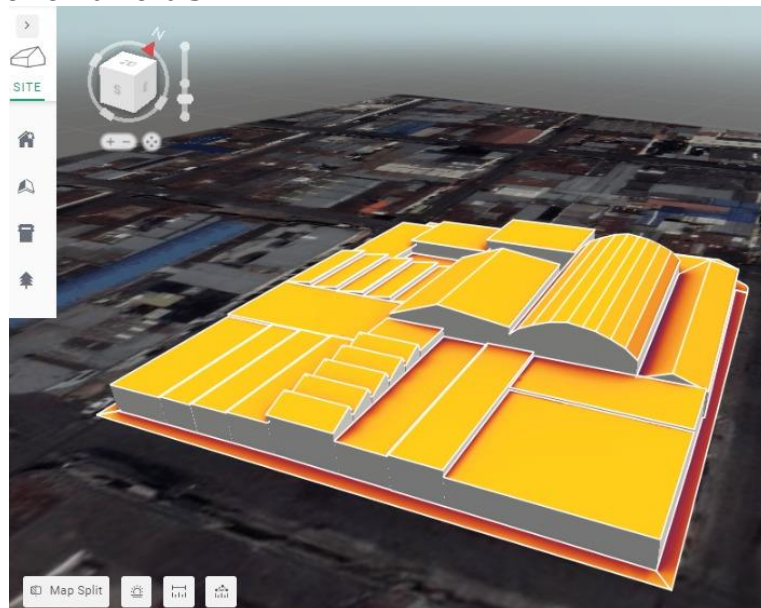
La carta psicrométrica obtenida desde *Ecotect* evidencia el desconfort térmico en la ciudad de Bucaramanga.

Carta Psicrométrica de Bucaramanga 2015-2020



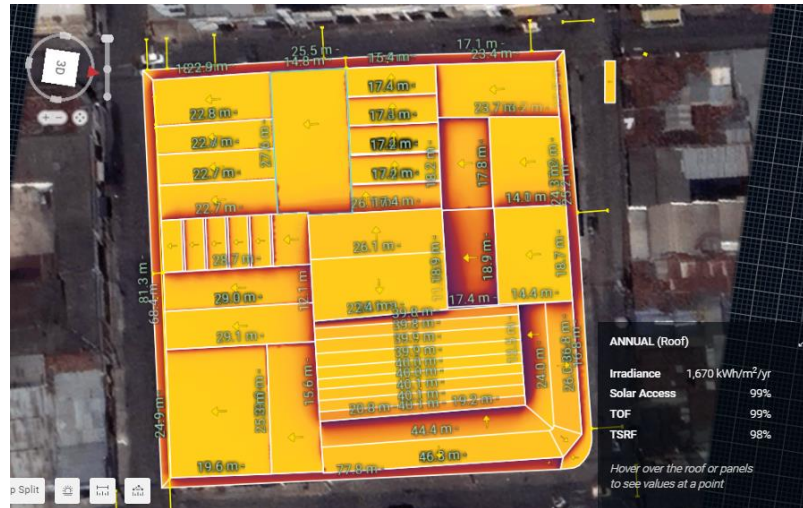
Con los datos normalizados y confirmados para el caso específico de temperaturas y radiaciones, se modeló la zona de máxima afectación por ICU (Zona 3), en el *software* Aurora, teniendo en cuenta los senderos peatonales y las cubiertas que absorben mayor radiación.

Análisis de radiación en la Zona 3



A partir de la revisión de irradiancia y acceso solar, el factor de inclinación y orientación en porcentaje (TOF *tilt and orientation factor*) fue posible detectar el andén y la cubierta de la zona 3 con mayor radiación anual.

Irradiancia y acceso solar anual en la zona 3



Nota: simulación de la zona 3 en Aurora Software

Andenes con mayor radiación detectados en la zona 3



Nota: en la imagen de la izquierda se percibe la simulación realizada en el andén de la carrera 13 entre calle 24 y 23. En la imagen de la derecha se observa la simulación sobre el andén de la calle 24 con carrera 14.

Irradiancia y acceso solar de andenes con mayor afectación en la zona 3

ANDENES				
Localización del Anden	Irradiancia kWh/m ² anual	Acceso Solar % anual	TOF %	TSRF %
Carrera 13	990	59	99	58
Calle 24	1360	81	99	80

Cubiertas con mayor radiación detectados en la zona 3



La zona 3 se caracterizó por registrar mayor afectación por ICU gracias a las actividades que se realizan en la zona, la poca arborización y los materiales que cubren el territorio en este espacio; por ello, fue prioritario la revisión de radiación solar anual en andenes y cubiertas que arrojará resultados precisos de irradiancia anual, como en el caso de la imagen 1 y 3 que revelaron acceso solar del 99% con una irradiancia anual de 1670 kWh/m².

Irradiancia y acceso solar de cubiertas con mayor afectación en la zona 3

CUBIERTAS				
Cubierta	Irradiancia kWh/m ² anual	Acceso Solar % anual	TOF %	TSRF %
Imagen 1	1670	99	99	98
Imagen 2	1660	99	99	98
Imagen 3	1670	99	99	98
Imagen 4	1270	76	99	75

Nota: el porcentaje de TOF es el resultado de la división entre radiación solar de la inclinación y orientación real sobre la radiación solar de la inclinación y orientación óptima. El porcentaje de fracción de recursos solares totales – TSFR (*Total Solar Resource Fraction*) que es el porcentaje obtenido de la proporción de la insolación disponible, teniendo en cuenta el sombreado y el factor de inclinación y orientación real sobre el óptimo (Aurora Solar, 2022)