Evaluación de Islas de Calor Urbano por medio de SIG y sensores remotos para el trazo de un nuevo corredor ecológico en la ciudad de Manizales

Por:

Santiago Arias Galvis

Informe final de trabajo de grado

Presentado como requisito parcial para optar al título de:

Especialista en

Sistemas de Información Geográfico

Director:

Ingeniero M.Sc José Fernando Mejía Correa

Asesora:

Ana María Giraldo Patiño

Línea de Investigación

Territorios inteligentes y sostenibles.

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2024

Resumen

El presente trabajo de investigación busca evaluar por medio de sensores remotos y SIG (Sistemas de Información Geográfico) las islas de calor urbana ICU o por sus siglas en inglés UHI (Urban Heat Islands), en la ciudad de Manizales, las cuales se definen como microclimas que se empiezan a desarrollar en los paisajes urbanos que se caracterizan por tener mayores temperaturas que las áreas suburbanas o rurales circundantes, situación que se ve agravada por el cambio climático. Además, se realizó un inventario de los principales componentes de la infraestructura ambiental urbana para contrastar las temperaturas superficiales del suelo LST del tejido urbano continuo con zonas arborizadas, establecer zonas críticas y finalmente proponer por medio de un análisis conceptual y espacial un nuevo corredor ecológico urbano que ayude a mitigar la problemática de Islas de Calor Urbana y que también pueda fortalecer procesos de conectividad entre algunas áreas de interés ambiental de la ciudad que actualmente se encuentran separadas unas de otras. Los resultados de esta investigación se representan en mapas de la ciudad que muestran las Temperaturas superficiales del suelo LST asociadas a sus zonas críticas de altas temperaturas que dan pista de la ocurrencia de islas de calor, finalmente se hizo el trazo de un sitio donde podría ubicarse el nuevo corredor ecológico para la ciudad de Manizales.

Palabras clave: Sistemas de Información Geográfica (SIG), Sensores remotos, Temperatura Superficial del Suelo LST, Islas de Calor Urbana UHI, Corredores ecológicos.

Abstract

This research work seeks to evaluate by means of remote sensing and GIS (Geographic Information Systems) the urban heat islands (UHI) in the city of Manizales, which are defined as microclimates that are beginning to develop in urban landscapes that are characterized by higher temperatures than the surrounding suburban or rural areas, a situation that is aggravated by climate change. In addition, an inventory of the main components of the urban environmental infrastructure was carried out to contrast the LST ground surface temperatures of the continuous urban fabric with wooded areas, establish critical areas and finally propose through a conceptual and spatial analysis a new urban ecological corridor that helps mitigate the problem of Urban Heat Islands and that can also strengthen connectivity processes between some areas of environmental interest in the city that are currently separated from each other. The results of this research are represented in maps of the city that show the LST ground surface temperatures associated with its critical zones of high temperatures that give clues to the occurrence of heat islands, finally a site was drawn where the new ecological corridor for the city of Manizales could be located.

Key words: Geographic Information Systems (GIS), Remote Sensing, Land Surface Temperature LST, Urban Heat Islands UHI, Green Corridors.

A mis padres y a Manizales.

Contenido

1.1 Descripción del área problemática 13

1.2 Formulación del problema 15

1.3 Justificación 15

2.1 Objetivo general 21

2.2 Objetivos específicos 21

3.1 Estudios de Islas de Islas de Calor Urbano Intencional 25

3.1.1 Caso India 25

3.1.2 Caso México 26

3.2 Estudios previos de Islas de Calor Urbanas Nacional 27

3.2.1 Caso Bogotá 28

3.2.2 Caso Armenia 29

3.2.3 Caso Manizales 29

3.3 Infraestructura Ambiental de Manizales 32

5.1 Usos de los corredores ecológicos 42

5.2 Islas de Calor 43

5.2.1 Razones por las cuales hay ocurrencia de Islas de calor urbana o UHI 44

5.3 Terminología Geoespacial 45

6.1 Enfoque metodológico 49

6.2 Tipo de estudio 50

6.3 Procedimental 50

6.3.1 Área de estudio 50

6.3.2 Fuentes de información (fase 1) 52

Recolección de la información Ambiental 52

Información sobre Temperaturas de la Ciudad 52

Herramientas Espaciales usadas 54

6.3.3 Temporalidad del Estudio 55

6.3.4 Manejo de información y sistema de referencia para productos cartográficos 57

6.3.5 Construcción de imágenes LST (fase 2) 58

1. Conversión de ND (Números Digitales) a Top Of Atmosphere TOA Radiansa proveniente de lo más alto de la atmósfera 58

2. Conversión de TOA a temperatura de brillo (BT) en grados ℃..... 61

3. Cálculo de Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) 61

4. Cálculo de Emisividad de la Superficie de la Tierra o “Land Surface Emissivity” (LSE) 63

5. Emisividad 63

6. Estimación de LST (Land Surface Temperature) 64

6.3.6 Identificación de áreas críticas 66

6.3.7 Elaboración y análisis de los índices de islas de calor urbana (UHI) (fase 3) 67

6.3.8 Propuesta de un nuevo corredor ecológico para la ciudad de Manizales. 72

7.1 Inventario y reconocimiento de la estructura Ambiental de Manizales (FASE 1) 76

7.1.1 Arborizado urbano. 78

7.2 Temperaturas en estaciones hidrometeorológicas (FASE1) 80

7.3 Temperaturas superficiales del suelo (FASE 2) 87

7.3.1 Mapa de Temperaturas superficiales del suelo para 2019 88

7.3.2 Mapa de Temperaturas superficiales del suelo para 2024 89

7.3.4 Análisis comparativo entre las temperaturas superficiales del suelo entre el 2019 Y 2024 91

7.4 Zonas críticas de altas temperaturas por comunas de Manizales. (FASE 2) 91

7.5 Cálculo de Índices de Islas de Calor (FASE 2) 94

7.5.1 Perfiles evaluados de Índices de Islas de Calor Urbano (UHII) (FASE 2)..... 98

Perfiles evaluados en 2019..... 98

Perfiles evaluados en 2024..... 102

7.6 Nuevo corredor ecológico para la ciudad de Manizales (FASE 3)..... 106

8. Conclusiones 113

9 Recomendaciones 116

10 Referencias bibliográficas..... 113

Lista de Figuras

Fig. 1 Propuesta de parques públicos en Braga, Portugal. 23

Fig. 2 . Mapa del IDEA de temperaturas en Manizales. 31

Fig. 3 Comportamiento típico de las islas de calor, donde hacía el tejido urbano más densamente poblado, se concentran también altas temperaturas con respecto a las zonas suburbanas..... 32

Fig. 4 Esquema de la estructura ecológica de soporte urbano de Manizales. 34

Fig. 5. Mapa de la estructura ecológica de la ciudad de Manizales para el año 2013 (Alcaldía de Manizales, 2013) 35

Fig. 6. Mapa de ubicación del municipio de Manizales. 50

Fig. 7. Con puntos naranjas se simbolizan las estaciones hidrometeorológicas: con la etiqueta 1. Palogrande (Estación Sede Posgrados), 2. La Macarena (Estación El Carmen) y 0. Ciudadela del Norte (Estación Quebrada el Guamo-lavaderos). 54

Fig. 8. Criterios de búsqueda en la plataforma Earth Explorer, en rojo la zona de estudio y recuadro más grande en color real es la totalidad de la escena capturada por el satélite..... 54

Fig. 9. Ilustración e interfaz de ArcGIS 10.8 con calculadora ráster operando con las diferentes bandas de la imagen satelital. 62

Fig. 10. Flujo metodológico llevado a cabo en el software de geoprocesamiento para la construcción de las imágenes de temperatura superficial del suelo. 65

Fig. 11. Ejemplo de valores usados para la imagen en el año 2019-1, visualizados en el software ArcGIS 10.8. 68

Fig. 12. Ejemplo de imagen procesada del 2019 donde se muestran gradientes de temperatura bajos asociados a los polígonos de las áreas de interés ambiental de la ciudad en color oliva, menta y fucsia y los gradientes de temperatura altos asociados a tejido urbano. 69

Fig. 13. Ejemplo de transectos o perfiles para evaluar la intensidad de los gradientes térmicos entre elementos de la infraestructura ambiental y el tejido urbano continuo. 70

Fig. 14. Herramienta usada para crear los perfiles de Índices de Islas de Calor Urbana. 71

Fig. 15. Ejemplo de tipo de archivo de exportación para histogramas de índices de islas de calor urbano. 71

Fig. 16. Mapa consolidado sobre las áreas de interés ambiental de Manizales. Elaboración propia 77

Fig. 17. Histogramas de temperaturas estación Ciudadela del norte 81

Fig. 18. Histogramas de temperaturas estación Posgrados. 83

Fig. 19. Histogramas de temperaturas para la estación La Macarena 85

Fig. 20. Delimitación y recorte de imagen de temperatura de la superficie para el municipio de Manizales, en rojo se identifican las zonas con más altas temperaturas (la zona urbana del municipio se mostró con altas temperaturas con respectos las áreas circundantes)., a diferencia de las áreas en azul que muestran temperaturas bajas. 87

Fig. 21. Mapa de temperaturas superficiales del suelo para enero del 2019 en la ciudad de Manizales. 88

Fig. 22. Mapa de temperaturas superficiales del suelo para febrero del 2024 en la ciudad de Manizales. 90

Fig. 23. Valores de desviación estándar y temperatura media usados en la ecuación de índices de islas de calor (UHII) para enero del 2019. 94

Fig. 24. Mapa de Islas de Calor Urbano UHI en el municipio de Manizales para el año 2019. Elaboración propia. 95

Fig. 25. Valores de desviación estándar y temperatura media usados en la ecuación de índices de islas de calor (UHII) para febrero del 2024. 96

Fig. 26. Mapa de Islas de Calor Urbano UHI en el municipio de Manizales para el año 2024. 97

Fig. 27. Histograma para el transecto desde tejido urbano continuo en la comuna La Fuente y el jardín botánico de la universidad de caldas o Parque central Universitario. 98

Fig. 28. Histograma para el transecto desde tejido urbano continuo en la comuna La Estación y relictos boscosos correspondientes a laderas ambientales urbanas o a las riberas de la quebrada Olivares. 100

Fig. 29. Histograma para el transecto desde tejido urbano continuo en la comuna La Macarena y relicto boscoso correspondiente a ladera ambiental urbana de “La Escombrera- El Bosque”. 101

Fig. 30. Histograma para el transecto desde tejido urbano continuo en la comuna Tesorito y el área de interés ambiental “Bosque Popular”. 103

Fig. 31. Histograma para el transecto desde tejido urbano continuo en la comuna Palogrande y un área de conectividad ecológica. 104

Fig. 32. Histograma para el transecto desde tejido urbano continuo en la comuna Universitaria y el área de interés ambiental “Cerro Sancancio”. 104

Fig. 33. Propuesta de nuevo corredor ecológico para la ciudad de Manizales. Elaboración propia. 106

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación propuesta por Van der Ree, R., & Bennett, A. F. (2003).. 41

Tabla 2. Características de los satélites Landsat 8 & 9..... 47

Tabla 3. Características de las imágenes satelitales usadas para la investigación. 56

Tabla 4. Características geodésicas de los productos cartográficos elaborados en la investigación 58

Tabla 5. Valores de las diferentes constantes encontradas en el metadato tanto de Landsat 8 como de Landsat 9, entre ellos están K1 y K2 son conocidos como valores de calibración..... 60

Tabla 6. Desarrollo de actividades con sus respectivos resultados..... 74

Tabla 7. Áreas por elemento de la infraestructura ambiental urbana. 79

Tabla 8. Valores de temperatura promedios máximos obtenidos de la estación hidrometeorológica “Quebrada el Guamo, Lavadero Los puentes” para los años evaluados. 82

Tabla 9. Valores de temperatura promedios máximos obtenidos de la estación hidrometeorológica “posgrados” para los años evaluados..... 84

Tabla 10. Valores de temperatura promedios máximos obtenidos de la estación hidrometeorológica “postgrados” para los años evaluados. 86

Tabla 11. Cantidad de áreas críticas, su área en kilómetros cuadrados por comuna. 92

1.Planteamiento del problema de investigación y su justificación.

1.1 Descripción del área problemática

La conservación de áreas de interés ambiental para la protección de la biodiversidad y la geodiversidad no es algo nuevo, pero muy pocas ciudades en Colombia tienen unos corredores ecológicos y biológicos suficientes en términos de servicios ecosistémicos, estos deberían tener unos estándares de tamaños y calidad que permitan brindar servicio como: el aprovisionamiento de agua, la regulación de eventos naturales extremos, regulación de la calidad del aire, regulación en la recarga de acuíferos y de interés cultural que permita el desarrollo de actividades recreacionales, educativas y científicas. En la ciudad de Manizales; los elementos que componen la infraestructura ambiental urbana que permite brindar los servicios ambientales necesarios son: Las laderas ambientales urbanas, las laderas perimetrales, algunas franjas de protección hidráulica de cauces de ríos con sus bosques riparios, reservas forestales del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) que incluye las reservas de la sociedad civil de carácter privado, ecoparques, arborizado urbano, etc. (Quintero López, N. (2021). Por otro lado, en Manizales, las construcciones para espacios públicos o de infraestructura ambiental parecieran los simples espacios residuales o en zonas de alta pendiente (Secretaría de Planeación Municipal, 2015) lo que hace que la infraestructura ambiental urbana planteada sobre el papel pareciera suficiente, pero en la práctica hay componentes de esta que no cumplen con sus funciones ecosistémicas, el arborizado urbano de los parques urbanos es a veces insuficiente para cubrir las necesidades ambientales, pues muchos de estos parques se limitan a placas

deportivas o plazoletas de cemento que no proveen sombra o capturan suficientes emisiones de carbono del tráfico, también está el ejemplo de algunas áreas de los ecoparques que tienen otros usos más deportivos o paisajísticos que no brindan los servicios ambientales necesarios para lo que fueron creados.

Las ciudades deberían cambiar su forma de urbanismo hacia maneras más sostenibles y en sintonía con el medio ambiente, ya que las malas prácticas de sostenibilidad y desarrollo durante muchos años han provocado que las ciudades caigan en grandes problemáticas como las denominadas islas de calor urbano o por sus siglas en inglés Urban Heat Island (UHI) donde la temperatura promedio tiende a ser mayor con respecto a otros lugares dentro de la misma ciudad, este problema se ve agravado por la falta de arborizado urbano que genera alta exposición a la radiación solar de personas y de objetos Faizan, M. (2020) En Colombia, el cáncer de piel ocupa el tercer lugar, con un aumento progresivo de la frecuencia de casos nuevos, siendo más frecuente en individuos mayores de 75 años Arsemot P. (2022)., esto a su vez agrava la pésima calidad del aire que se respira en las ciudades generando también problemas de salud pública que afectan de por sí la calidad de vida de toda la población Campbell, S. (2021). El nivel máximo permisible anual nacional para Colombia es de PM10 es de 50 µm /m3, y ninguna de las estaciones de Manizales supera este límite. Sin embargo, dos estaciones, Milán y el Liceo Isabel la Católica, aún no alcanzan los niveles recomendados por la OMS, que son de 20 µm /m3

(https://manizalescomovamos.org/noticias/boletines-2024/manizales-calidad-del-aire-presenta-avances-pero-aun-hay-retos-por-superar/).

Cómo fin último de este trabajo de grado, se propuso el trazado de un nuevo corredor ecológico, que interconecte los diferentes relictos boscosos o las áreas de interés ambiental dentro de la infraestructura ambiental de la misma ciudad, que pueda servir como atenuante de la problemática ambiental de islas de calor urbana.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo se podría identificar usando Sistemas de Información Geográfico (SIG) las islas de calor urbana (ICU) en la ciudad de Manizales y qué medidas de mitigación se podrían implementar para solucionar dicha problemática ambiental fomentando un desarrollo urbano sostenible y en sintonía con el medio natural?

1.3 Justificación

La ciudad de Manizales ubicada en el flanco oeste de la cordillera central de los Andes del norte, contiene un ecosistema de bosque alto andino, que posee una importancia significativa

para el abastecimiento de agua de muchas poblaciones que cohabitan los flancos de la cordillera. Actualmente, la ciudad se encuentra bajo la presión de la construcción de nuevas viviendas y vías para la movilidad de las personas que habitan el territorio, estas dinámicas expansivas de la ciudad en la concepción actual de desarrollo son contrarias a la conservación del ambiente natural, evidencia de esto es que algunas empresas constructoras hacen lo necesario para influenciar cambios en el Plan de Ordenamiento Territorial POT donde se le otorgan o venden nuevos predios destinados y usados para la construcción.

Manizales posee proyectos de Ecoparques que propenden por la conservación ambiental, pero estos se encuentran separados los unos de los otros como si fueran islas verdes en un mar de cemento, lo que interviene la conectividad que es necesaria para la variabilidad genética y la migración de individuos entre un relicto boscoso y otro. El espacio verde urbano, como parques, relictos de bosques, franjas de protección hidráulica de cauces de ríos, ecoparques, laderas ambientales urbanas, etc.; provee a los ciudadanos de muchos servicios ambientales, como también promueve la actividad física, la salud mental y en general una buena salud pública en el ambiente urbano. Matsuoka, R. H., & Kaplan, R. (2008).

Las islas de calor urbanas están relacionadas con escasez de arborización y también a tejidos urbanos construidos con materiales de construcción de fachadas, techos y vías que tienen

mal comportamiento térmico, los cuales se calientan llegando a modificar la atmósfera circundante más próximo a la superficie (Orozco Arquez, L. A. (2020) y (Wang, Zhou & Wang. 2019) hay un rezago de las ciudades latinoamericanas en el monitoreo de las islas de calor, a pesar de que muchas de estas son grandes ciudades capitales que concentran gran cantidad de población. Quiñones, U. M. (2022). Esta investigación pretende proponer un modelo de conectividad por medio de un corredor ecológico para unificar dentro de la ciudad algunos de los relictos boscosos o áreas de interés ambiental los cuales se van a inventariar y que dicho corredor sirva como atenuante en la ocurrencia de islas de calor urbanas que se identifican por medio de sensores remotos, cabe resaltar que esta propuesta se limitaría a algo que podría o no ser ejecutada por las autoridades ambientales locales y el gobierno, por esto no se sabe cuál sería el plazo en que se podría desarrollar, pero la utilidad de este trabajo radica en hacer conocer que estos modelos de conectividad entre áreas de interés ambiental pueden generar un impacto positivo directo en la solución de diversos problemas como: el déficit de espacio público, en la lucha contra el cambio climático, en el mejoramiento de la calidad del aire, en la mejoría de la sensación térmica en fenómenos climáticos extremos y por consiguiente van a tener un impacto directo en la salud pública.

Esta investigación demuestra una aplicación más de los sistemas de información geográfica en la medición de factores socioambientales para la toma de decisiones de las

secretarías de planeación municipal, las autoridades ambientales y las corporaciones autónomas regionales. Dichas decisiones están relacionadas con la distribución de áreas de interés ambiental, para la conformación de una estructura ambiental urbana más integral y útil en la conectividad de ecosistemas que promuevan la conservación de la biodiversidad, como también el mejoramiento de la calidad de vida de sus pobladores.

La conservación y la conectividad de las áreas de interés ambiental supone una necesidad para todos, por ejemplo, las laderas ambientales urbanas son el mecanismo con el cual se evitan movimientos en masa que destruyan la infraestructura y cobren vidas humanas. Los ecoparques de Manizales son el hábitat de muchas especies de mamíferos, insectos, reptiles y aves que a su vez son el atractivo que muchas empresas de turismo usan, son también usadas por muchos ciudadanos para; disfrutar el libre esparcimiento, tener momentos de ocio que genera un bienestar psicológico, propenden por la salud mental de la ciudadanía, mejoran la calidad del aire dentro de la ciudad y suponen microclimas más frescos en días soleados. Matsuoka, R. H., & Kaplan, R. (2008).

Para la comunidad mundial y especialmente para los organismos internacionales que velan por la sostenibilidad es relevante tener en cuenta que: “La importancia de los corredores ecológicos urbanos radica en que no solo promueven una conexión entre la fauna y la flora locales, sino que también contribuyen a la construcción de ciudades más sostenibles, uno de los

Objetivos de Desarrollo Sostenible promovidos por la ONU y una necesidad apremiante si queremos acelerar la transición hacia un futuro más verde para mitigar los efectos del cambio climático" Quintero, C. A. M., Rendón, S. D., & Sánchez, A. D. (2023).

El análisis de índices de Islas de Calor Urbano dentro de la ciudad de Manizales, puede ser el inicio de muchos estudios futuros en UHI para la ciudad, como por ejemplo: la geometría de estas, su intensidad, su estimación horaria y mensual (Enríquez & Romero, 2019) citado por Quiñones, U. M. (2022) , el estudio de las UHI atmosféricas que ya están cambiando de forma irreversible los microclimas de los alrededores de las ciudades (Shandas et, al, 2019), finalmente, otra profundización en materia podría ser su análisis dependiendo de la altura sobre el nivel del mar en ciudades con topografías montañosas.

La propuesta de construcción de un corredor ecológico es de utilidad para incentivar el tránsito de especies de aves, mamíferos y vegetación, también podría convertirse en parques lineales como una solución al déficit de espacio público que presenta actualmente Manizales (Quintero López, N. (2021), teniendo en cuenta que el espacio público de calidad ambiental es necesario para una ciudad que quiere promocionar la educación, la salud mental, la salud física, la recreación y el deporte. También pueden ser utilizados como senderos ecológicos donde las personas puedan salir a correr, montar en bicicleta o compartir una tarde con amigos (Duque S. & otros, 2000). Este proyecto es novedoso porque desarrolla un análisis de los índices de islas de

calor por medio de imágenes satelitales de Landsat 8 & 9 en épocas de lluvia y en épocas secas para una temporalidad de 5 años la cual se plantea por la celeridad que se observa en los procesos de cambio climático. Si bien este fenómeno se había analizado anteriormente en la ciudad con el trabajo de Roncancio Rubio, D. N. (2013)., la diferencia radica por el contexto de actualidad en que se plantea, donde hay recursos tecnológicos y fuentes de información más desarrollados usados para establecer los puntos críticos de las altas temperaturas dentro la ciudad, los cuales se convierten en factores decisivos para trazar un nuevo corredor ecológico.

Después de realizada esta investigación los gobernantes, las corporaciones autónomas regionales y las autoridades ambientales que tengan acceso a esta información podrán tomar decisiones ambientales más informadas y en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU en sincronía con los objetivos 3, 6, 11, 13 y 15 que hablan de salud y bienestar, agua limpia y saneamiento, ciudades y comunidades sostenibles, acción por el clima y cuidado de los ecosistemas terrestres respectivamente (ONU, 2018). Finalmente, la investigación es pertinente para demostrar una vez más como los Sistemas de Información Geográficos integrados con el análisis de imágenes satelitales provenientes de sensores remotos son útiles para abordar de forma sencilla y entendible temáticas de territorios sostenibles.

2.Objetivos

2.1 Objetivo general

Definir por medio de sensores remotos y SIG, las islas de calor urbana cómo criterio en el trazado de un corredor ecológico adicional a los preexistentes, entre algunas de las diferentes áreas de interés ambiental en la ciudad de Manizales.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar un inventario de los componentes de la Infraestructura Ambiental del municipio de Manizales que permita el análisis de Islas de Calor Urbano.
- Identificar áreas críticas de altas temperaturas superficiales del suelo (LST) mediante el uso de imágenes satelitales y complementarlas con los datos de temperatura registrados en las estaciones hidrometeorológicas del sistema de monitoreo ambiental local.
- Relacionar la ocurrencia de Islas de Calor Urbanas con la Infraestructura Ambiental de Manizales, con el propósito de crear procesos de conectividad como herramienta de manejo del paisaje.

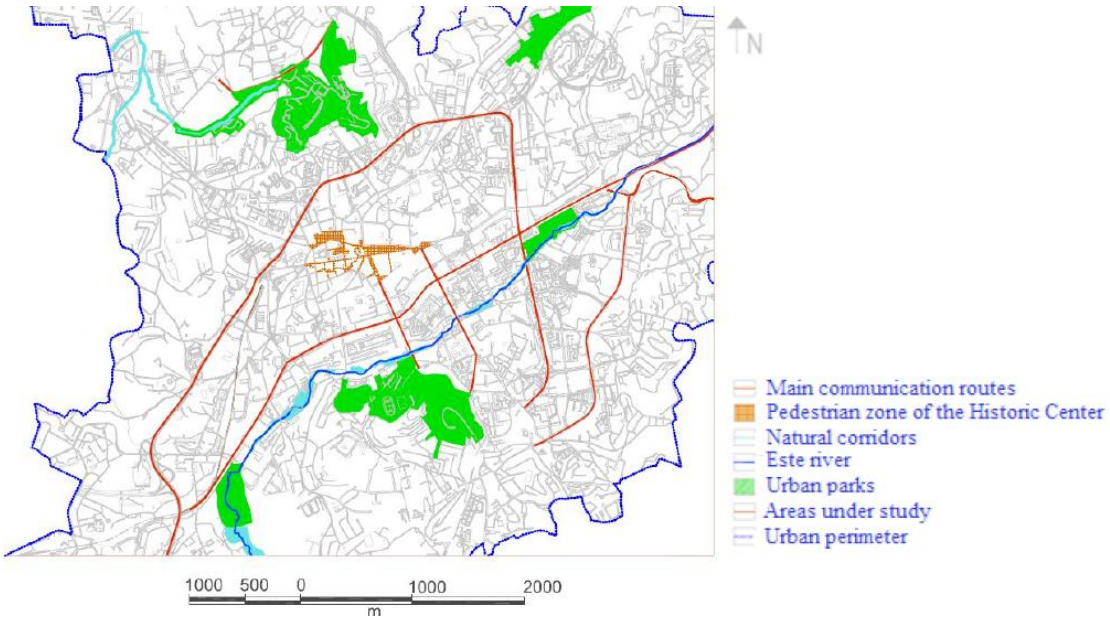
3.Antecedentes

La fragmentación de ecosistemas, y del bosque en particular, es para los ecólogos uno de los procesos que más afectan severamente a la biodiversidad, especialmente en los ecosistemas tropicales (Le Cœur, D., Baudry, J., Burel, F., & Thenail, C. (2002). Estos fragmentos remanentes usualmente están rodeados de monocultivos, de grandes extensiones de pasto o simplemente de ciudad y cemento. Esto ha conducido a la reducción de poblaciones y a procesos de extinción de ciertas especies, sobre todo de aquellas denominadas especies endémicas que dependen únicamente de ciertos hábitats para sobrevivir Ersoy, E. (2016).

Una forma de contrarrestar este atropello ecosistémico, es la construcción de corredores ecológicos dentro de las ciudades que aporten en la estructura ambiental de las ciudades, los corredores pueden estar englobados por las cuencas de los ríos o franjas de protección hidráulica, relictos de bosques, laderas ambientales urbanas, laderas perimetrales, etc. Estos elementos mencionados aportan de forma positiva para la retención de partículas gases de efecto invernadero en el aire, aumentando así la calidad del mismo, también la temperatura local en las ciudades puede verse disminuida por las zonas arborizadas Rocha, M. E., & Ramos, R. A. (2012). Hay muchos ejemplos de construcción de corredores ecológicos, uno de ellos es en Braga, Portugal donde se propuso un modelo de interconexión entre los principales parques y cuencas de ríos de la ciudad por medio de la siembra y regeneración de árboles circundantes de

los senderos peatonales y del ciclo rutas, logrando así que la ciudad incentive la movilidad limpia por medio de la bicicleta y las caminatas. Lograron que la ciudad tuviera aproximadamente 5 corredores arborizados más, como se ve en la Figura 1 siendo públicos urbanos (en verde), interconectados por medio de senderos peatonales y de ciclo rutas (en naranja) y algunos de ellos conectados biológicamente por medio del cauce del río (en azul).

Fig. 1 *Propuesta de parques públicos en Braga, Portugal.*



Nota: Fuente: Rocha M. et al (2012).

No siempre los corredores ecológicos son tan eficientes o se les puede atribuir los servicios ambientales que podrías prestar, pues se ha tergiversado su uso o no tienen una

extensión suficiente; este sería en caso de Bogotá en Colombia, donde los corredores biológicos que unen los principales elementos de la Estructura Ecológica Principal (Cerros Orientales, Valle aluvial del río Bogotá y el páramo de Sumapaz) tienen unos potenciales que se diferencian debido su espesor, la distancia entre coberturas naturales y el núcleo del paisaje que recorre, aunque en el POT de esta ciudad se definen como corredores ecológicos, no todos coinciden con esta realidad pues estos corredores poseen diferentes potenciales para generar el flujo de especies y servicios ambientales Remolina Angarita, F. (2005)

Hablar de los corredores ecológicos en la ciudades empieza a tomar importancia en los estudios de islas de calor urbano cuando evaluamos que los diferentes factores según, EPA (2008) por los cuales se produce dicho fenómeno, siendo uno de ellos y de los principales ***la reducción de la vegetación en zonas urbanas,*** al perder la cobertura vegetal, se limitan los procesos de evapotranspiración desarrollados por las plantas, que permiten la liberación de agua a la atmósfera que a su vez regula la temperatura ambiente. entre otros factores como ***las propiedades térmicas de los materiales,*** donde la radiación solar se refleja o se absorbe, siendo las ciudades construidas en cemento, asfalto, ladrillo, etc. tienen unas propiedades físicas como la *capacidad calórica* que hacen que su respuesta ante la radiación sea de absorbencia en vez de reflectancia como las cubiertas vegetales o el agua que tienen otras propiedades físicas al momento de interactuar con dicha radiación. Hay otros factores que potencian la ocurrencia de

islas de calor urbanas que se mencionan en este mismo trabajo más adelante. Orozco Arquez, L. A. (2020).

3.1 Estudios de Islas de Islas de Calor Urbano Intencional

3.1.1 Caso India

Chennai, India es una ciudad de una gran población, superando los 9 millones de habitantes en su zona metropolitana, el clima de la parte urbana se está tornando más cálido día tras día, con base a dicha problemática, se emprende un estudio del espacio temporal de con imágenes Landsat 7 y 8 para los años 2000, 2010 y 2020, usando ArcGIS 10.8 se calcularon los principales parámetros para llegar a determinar islas de calor como la temperatura superficial LST, el Índice de Vegetación Normalizada NDVI, como también el uso del suelo y las coberturas del mismo. dicha investigación arrojó que las altas temperaturas estaban asociadas a áreas densamente construidas, en contraste con áreas que tienen gradientes térmicos menores relacionadas con áreas con vegetación Faizan, M. (2020).

3.1.2 Caso México

En el estudio de Ulises Manzanilla Quiñones de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en 2022, las Islas de Calor Urbana (ICU) ya son consideradas como problemas medioambientales definiéndose como: “Áreas urbanas con un incremento en la temperatura superficial terrestre en comparación con zonas suburbanas, o rurales que las rodean”. en dicho estudio también se hace una caracterización de los tipos de ICU, existiendo las ICU superficiales que representan una diferencia de la temperatura registrada en los distintos materiales y superficies urbanas como azoteas y pavimento y la segunda que son ICU atmosféricas caracterizándose por diferenciar las temperaturas ambiente del aire circundante de ambientes urbanos y ambientes rurales, vegetados y suburbanos (Sobrino, J. A., Sòria, G., Oltra Carrió, R., Jiménez-Muñoz, J. C., Cuenca, J., Hidalgo, V., ... & Gimeno13, L. (2009). DESIREX 2008). También se menciona que la ocurrencia de ICU tiene una influencia directa en el aumento de consumo de energía eléctrica por el uso de aires acondicionados, lo cual ocasiona a su vez un aumento en la contaminación por gases de efecto invernadero Quiñones, U. M. (2022).

La identificación de las islas de calor urbanas para este caso en Monterrey, México se realizó con imágenes multiespectrales provenientes del satélite Landsat 8 y procesadas con el software

QGIS. Luego al reclasificar los valores de temperatura superficial terrestre obtenidos, que son mayores al valor promedio histórico registrado por las estaciones meteorológicas de la zona de estudio Quiñones, U. M. (2022).

. La diferencia hallada entre la temperatura promedio histórica registrada por las estaciones meteorológicas de la zona metropolitana de Monterrey y la temperatura superficial terrestre estimada mediante el uso de bandas multiespectrales para esa misma zona fue de hasta +8.9° C Quiñones, U. M. (2022).

3.2 Estudios previos de Islas de Calor Urbanas Nacional

Según la búsqueda bibliográfica en diferentes repositorios y fuentes académicas que se hizo para este trabajo, a manera informativa se podría decir que aproximadamente en los últimos 30 años Colombia solo cuenta con menos de 30 estudios que tienen alguna relación con Islas de Calor Urbanas, muchos de estos concentrados en ciudades como Bogotá, Medellín y Cali. Por otro lado, algunos estudios particulares se han adelantado en ciudades como Ibagué y Manizales dejando rezagados otros territorios en esta materia de estudios de este tipo. Cabe destacar que, si bien hay estudios en la materia, no todos están enfocados a estudiar en sí mismas las islas de calor, sino que son estudios que reconocen la existencia y la problemática de las ICU, y que además proponen estrategias de reforestación para su disminución.

3.2.1 Caso Bogotá

Aragón, J. A., Rodríguez, E. D., Varón, G. A., & Sánchez, G. A. (2020). Hicieron un trabajo para delimitar la geometría de las Islas de Calor Urbana (ICU) en la sabana de Bogotá por medio de los sistemas de información geográficas y métodos estadísticos, así como, comparar los resultados obtenidos con las imágenes satelitales y estaciones meteorológicas en los periodos 2015 y 2018. Con un análisis temporal de 3 años queda demostrado que cuando se trata de análisis de temperaturas en tiempos de cambio climático, los cambios se pueden detectar con temporalidades relativamente bajas.

Para el análisis estadístico de los registros de estaciones meteorológicas se siguieron los siguientes lineamientos: los datos de las estaciones, se homogeneizaron y se consolidaron en el mismo formato para el análisis estadístico en una hoja de cálculo electrónica, haciendo un control de datos se verificó primero que los datos no sobrepasan los máximos y mínimos registrados en la ciudad de Bogotá los cuales equivalen a 25 °C y 0 °C respectivamente, siendo en total 1.011 datos, de manera que todos los datos fueron validados. Sin importar el año analizado se puede encontrar una diferencia de temperatura mayor entre la zona urbana y la rural, al oriente de la ciudad, alcanzando diferencias de hasta 8.37°C en el 2015 y 8.34°C en el 2018.

3.2.2 Caso Armenia

Para en caso de Armenia, Colombia se hizo un análisis de imágenes satelitales, acompañado de métodos estadísticos, utilizando imágenes de 1996 provenientes de Landsat 5 e imágenes de 2018 de Landsat 8, donde se buscó medir la temperatura de diferentes superficies presentes en la ciudad como: suelo desnudo, tejido urbano, suelo cubierto por vegetación, entre otros. De este caso cabe destacar que el área de estudio es similar a esta investigación, debido a que ambas áreas de estudio pertenecen una topografía similar y otras características climáticas similares que se comparten en el eje cafetero.

la metodología usada para estimar la temperatura superficial del suelo, en este estudio consistió, en corregir la temperatura de brillo en la parte superior de la atmósfera teniendo en cuenta los índices de vegetación y tres diferentes algoritmos para estimar los valores de radiancia provenientes de las imágenes satelitales, entre estos algoritmos se encuentran Split Window, Single Channel y Multi- Angle.

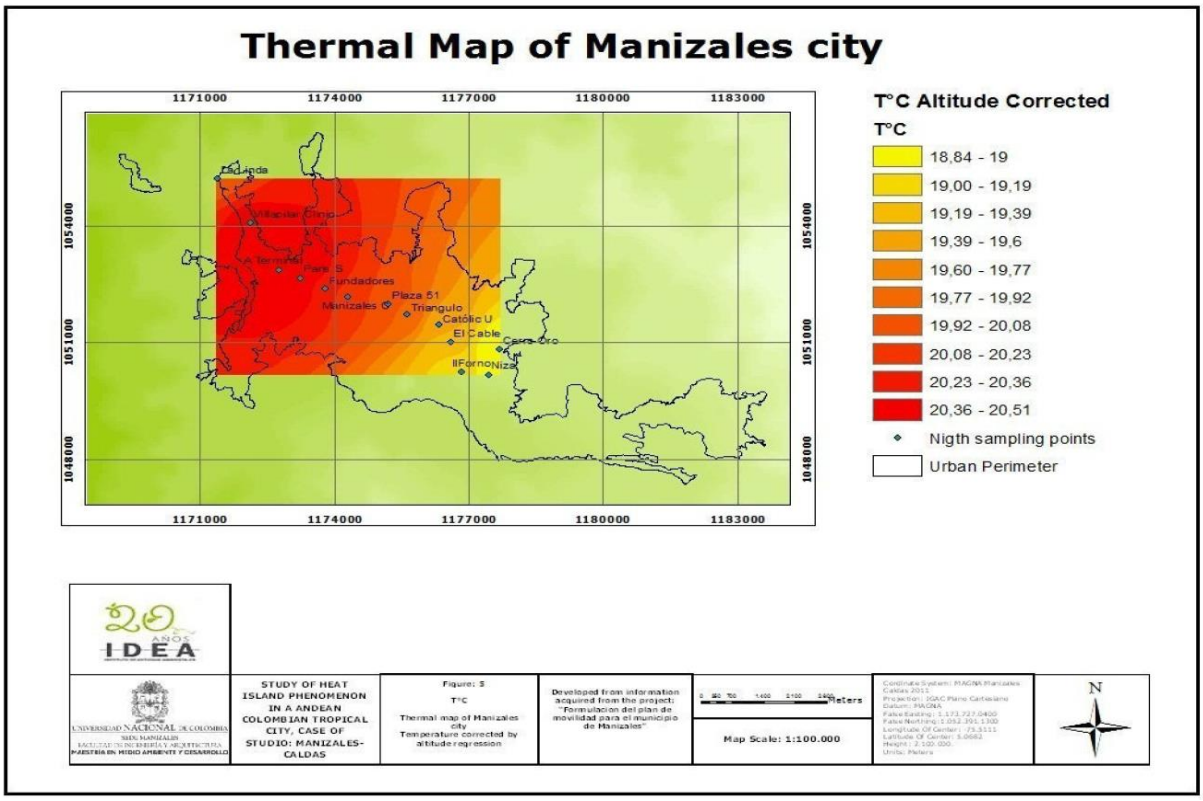
3.2.3 Caso Manizales

En Manizales se llevó a cabo un estudio de ICU por parte de la profesora Dalia Nuit Roncancio Rubio de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales en el año 2013, donde fue utilizado el método de transectos térmicos en 13 estaciones móviles, localizados en puntos característicos de la ciudad. Se utilizó una camioneta en la cual, se instaló una estación

meteorológica móvil Davis Instruments®, la cual midió la dirección de los vientos y la temperatura ambiental para poder después cruzar esta información con las estaciones de monitoreo instaladas por el Instituto de Estudios Ambientales IDEA de la misma universidad. Con dichas evaluaciones en campo se lograron determinar mapas térmicos de la ciudad, hasta en horarios nocturnos, llegando a conclusiones como que en el centro de la ciudad donde hay una gran actividad económica y alta densidad poblacional hasta la actualidad, existe la problemática ambiental de islas de calor urbana.

La siguiente figura No. 2 muestra el mapa termal obtenido para la ciudad de Manizales en el año 2013. Reportado por un estudio de la Universidad Nacional, donde se observa un alto gradiente térmico hacia el centro de la ciudad en las estaciones Terminal y Fundadores, con una diferencia casi de 2 °C con respecto a las estaciones Niza y El Cable instaladas al oriente de la ciudad.

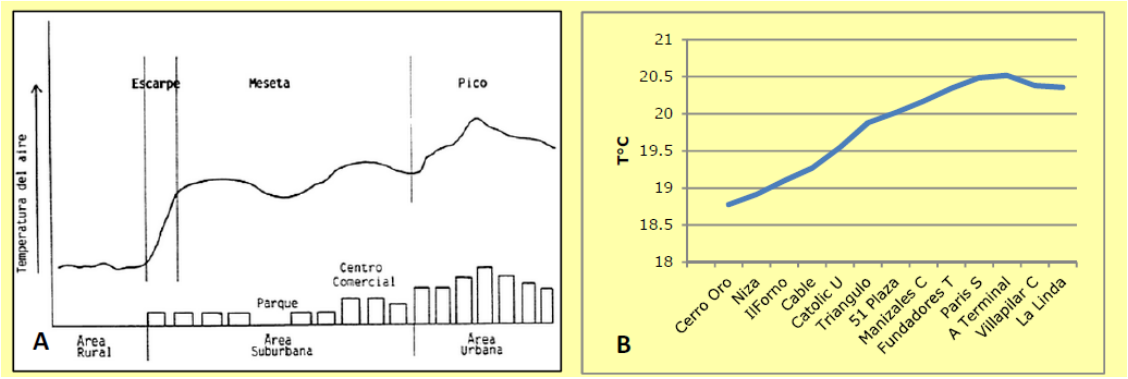
Fig. 2 . *Mapa del IDEA de temperaturas en Manizales.*



Nota: Fuente: Roncancio Rubio, D. N. (2013)

Se evidenció que, a pesar de que los diferentes lugares donde se instalaron las estaciones de monitoreo de la ciudad tenían la misma altura, si existía un comportamiento propio de ocurrencias de las ICU en la ciudad como se muestra en la siguiente figura extraída de esta misma investigación del IDEA en manos de la profesora Dalia Nuith Roncancio Rubio.

Fig. 3 *Comportamiento típico de las islas de calor, donde hacía el tejido urbano más densamente poblado, se concentran también altas temperaturas con respecto a las zonas suburbanas*



Nota: Oke, T. R. (1976), caso que se replica en la ciudad de Manizales.

3.3 Infraestructura Ambiental de Manizales

Manizales está conformada por una estructura ecológica urbana que se ha venido construyendo y protegiendo desde tiempos posteriores a su fundación, entre los lugares con una importancia ambiental están: los diferentes ecoparques, las laderas perimetrales de la ciudad, las rondas hídricas, las reservas de la sociedad civil, otras áreas de interés ambiental. Muchos de los relictos boscosos que quedan en Manizales son necesarios para el aporte de servicios ecosistémicos y para la conservación de la biodiversidad.

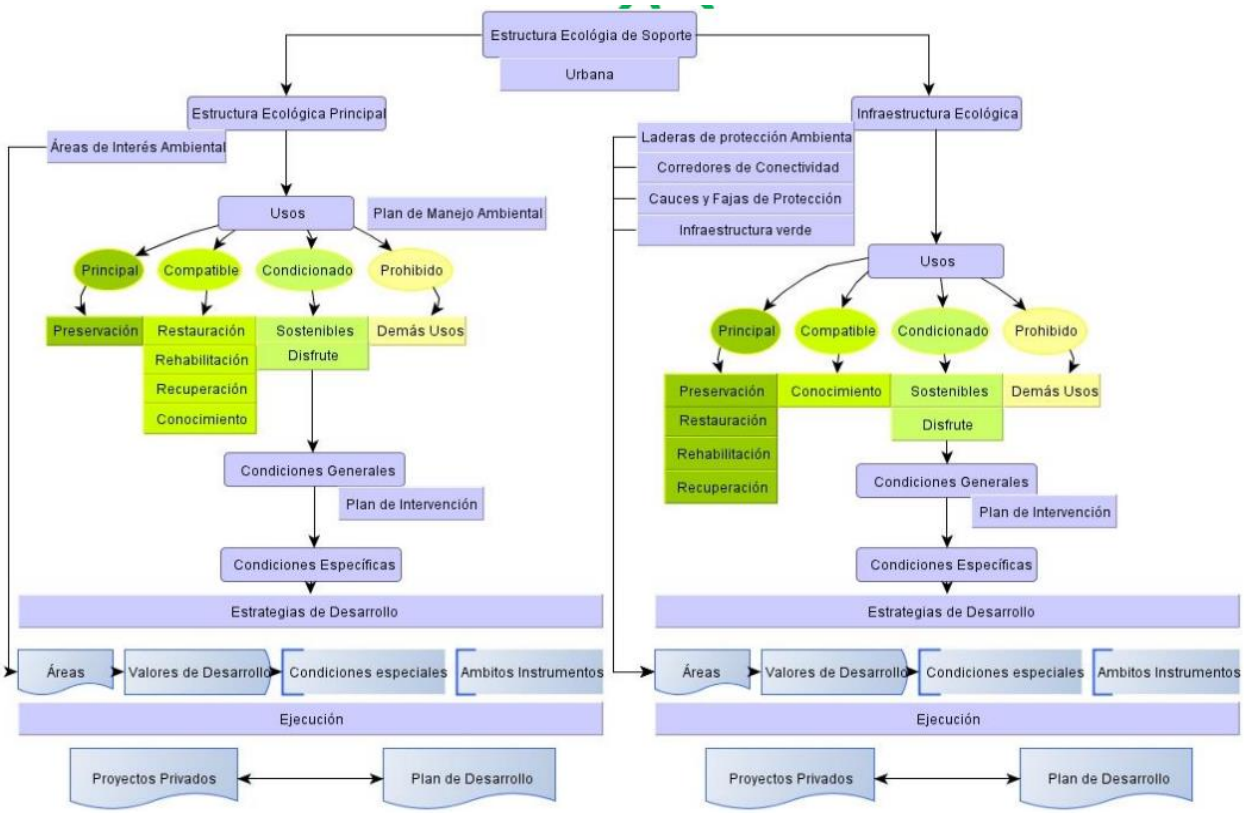
Dentro del Plan de Ordenamiento Territorial 2015- 2017 de la ciudad de Manizales está la categoría **de *suelo de protección Urbano***, esta característica se le brinda a partes del territorio que por sus características geográficas, paisajísticas o ambientales; por ejemplo, *las laderas perimetrales o laderas ambientales urbanas* que son fundamentales son áreas donde hay riesgo de deslizamiento o de movimiento en masa **no mitigable,** por este motivo no se pueden ubicar allí asentamientos humanos como casas o edificios de apartamentos. dichas laderas son de vital cuidado para la prevención de movimientos en masa que pueden desencadenar pérdidas materiales y humanas en época de lluvias.

Las categorías de **suelo de protección urbano son las siguientes:** áreas de conservación y protección ambiental, Áreas de amenaza y riesgo, áreas del sistema de servicios públicos domiciliarios, Áreas de inmuebles considerados patrimonio cultural

Para esta investigación se tendrá en cuenta las ***áreas de conservación y protección ambiental urbana*** que para el caso de Manizales en la categoría de áreas de conservación y protección ambiental urbana de Manizales se desarrolla a través de la **Estructura Ecológica de Soporte Urbana**. Los componentes actuales de la estructura ecológica urbana de Manizales son: áreas de interés ambiental municipal (Cerro Sancancio, Ecoparque los Alcázares, Bosque de Monteleón, Ecoparque los Yarumos, Bosque Popular el Prado y el Parque Central Universitario o Jardín Botánico de la Universidad de Caldas), laderas ambientales urbanas, laderas

perimetrales, rondas hídricas o áreas de interés hídrico e infraestructura verde. La siguiente figura muestra el esquema adoptado por las municipalidades en el año 2015 de la estructura ecológica de soporte urbano de Manizales

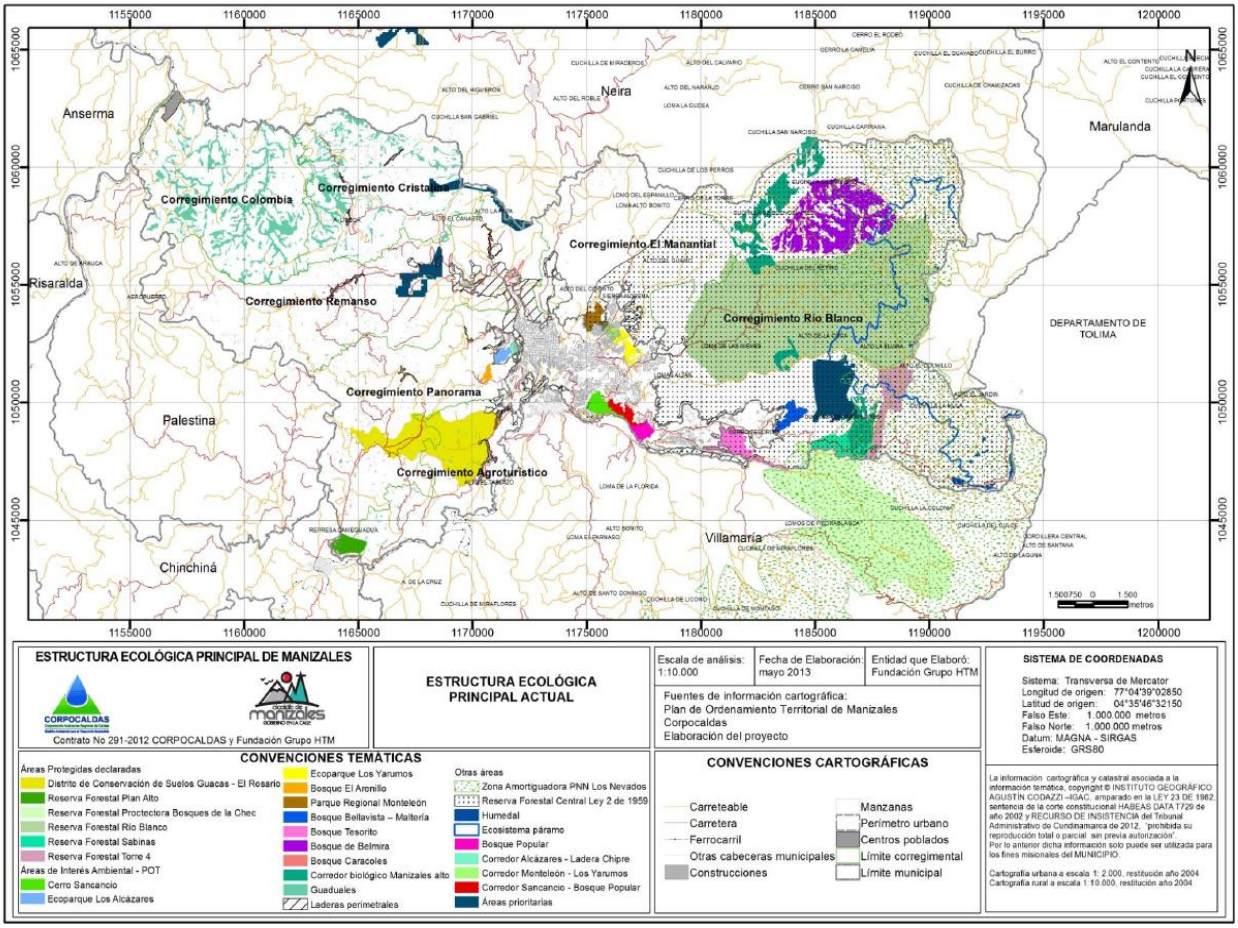
Fig. 4 *Esquema de la estructura ecológica de soporte urbano de Manizales.*



Nota: (Secretaría de planeación municipal, 2015).

La siguiente figura muestra el mapa de la ciudad de Manizales con su estructura ecológica definida para el año 2013.

Fig. 5. *Mapa de la estructura ecológica de la ciudad de Manizales para el año 2013 (Alcaldía de Manizales, 2013)*



El plan de ordenamiento territorial del periodo 2015-2027 no ha cambiado la forma en que se cuida los relictos de bosques, pues siguen existiendo las mismas zonas de protección que existían en el año 2013, por lo tanto, el panorama no ha cambiado mucho desde entonces, por eso este proyecto pretende aumentar en área y en calidad la estructura ecológica de la ciudad.

En estas áreas de especial interés ambiental se tienen los parques naturales de nivel municipal, algunos ya muy devastados por la presión urbanística como es el caso de Monteleón y el Bosque Sinaí (Secretaría de Planeación Municipal, 2015) El ecoparque los Alcázares - Arenillo está definido por el Plan de Desarrollo "Manizales Ciudad Siglo XXI" como un área verde de interés público para recreación, dadas sus condiciones ambientales y paisajistas. En el área del ecoparque está ubicada la quebrada La Francia de la cual queda únicamente su corriente principal, siendo las demás destruidas por las explanaciones realizadas para nuevas urbanizaciones. El objetivo del parque es una recreación didáctica ambiental. Existen también las zonas de ladera como áreas que revisten especial importancia y que deben conservarse como estructura verde. Entre ellas están la ladera de Chipre o la Avenida 12 de octubre.

4.Referente normativo y legal

Las siguientes leyes y decretos constituyen el marco legal que cubre las normativas del Plan de Ordenamiento Territorial (POT), de los recursos naturales y del medio ambiente:

Ley Orgánica del Ordenamiento Territorial (1454 DE 2011): Esta ley establece que el ordenamiento territorial busca aumentar la capacidad de descentralización, planeación. y gestión y administración de los intereses propios en las entidades e instancias de integración territorial. También contempla la asociatividad como una herramienta para el diseño, implementación y ejecución de políticas, programas, proyectos y acciones de interés común.

Ley 810 de 2003: Establece que los concejos municipales y distritales pueden revisar y ajustar los planes de ordenamiento territorial.

Ley 388 de 1997: Define el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) como el instrumento básico para que los municipios y distritos planifiquen el ordenamiento del territorio.

Decreto 1743 de 1994: Establece el Proyecto de Educación Ambiental para todos los niveles de educación formal.

Ley 99 de 1993: Crea el Ministerio de Ambiente, organiza el Sistema Nacional Ambiental y define el ordenamiento ambiental territorial.

Decreto Ley 2811 de 1974: Establece el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Medio Ambiente.

Decreto 1337 de 1978: Reglamenta la implementación de la Educación ecológica y la preservación ambiental en el sector educativo.

Ley No. 27.621: Establece el derecho a la educación ambiental integral como una política pública nacional.

La constitución política de Colombia de 1991 en su artículo 79 y 67 establece el derecho a gozar de un ambiente sano y el deber de proteger la diversidad e integridad del ambiente, buscando formar al ciudadano para la protección del ambiente.

5.Referente teórico

Los siguientes son tópicos del marco teórico que tiene características propuestas por los funcionarios del Jardín Botánico de Bogotá:

- **Estructura Ecológica:** Conjunto de ecosistemas naturales y seminaturales que tienen una localización, expansión, conexiones y estado de salud tales que garantice el mantenimiento de la integridad de la biodiversidad, la provisión de servicios ambientales (agua, suelos, recursos biológicos y clima), como medida para garantizar la satisfacción de las necesidades básicas de los habitantes y la perpetuación de la vida (Remolina-Angarita, F. (2005)).
- **Áreas de interés ambiental urbanas:** Aquellas zonas de terreno de importancia estratégica municipal y de soporte que permiten la conservación, restauración y uso sostenible de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, con condiciones especiales para su uso y manejo. Grupo, H. C. (2008).
- **Infraestructura Ecológica Urbana:** Conjunto de elementos construidos o transformados por el ser humano, con relictos de vegetación natural remanente, corredores y áreas a restaurar en los agroecosistemas; como cercas vivas, corredores biológicos, parques y zonas verdes. (Remolina-Angarita, F. (2005)).
- **Laderas de interés ambiental:** Son relictos boscosos que generan una conectividad entre ecosistemas que suelen estar en terrenos con pendientes superiores a los 40 grados, que permiten prevenir movimientos en masa. Grupo, H. C. (2008).
- **Rondas hídricas o cauces y fajas de protección de corrientes hídricas:** Según la resolución 561 de 2012, se considera cauce hídrico toda depresión en el terreno que

transporte agua de forma permanente y dichos cauces tienen una franja de vegetación aledaña que cumple la función de protección ante eventos catastróficos y preservar el recurso del agua.

Por otro lado, se tienen a los ríos urbanos que son ecosistemas complejos donde el agua que aflora actúa como el hábitat de fauna y flora, también se usan para la recreación de la sociedad. Son espacios para la protección de la naturaleza y la biodiversidad, control climático y actúan como atenuantes o protectores de la población ante las amenazas naturales como inundaciones y efectos del cambio climático. Además, brindan servicios ecosistémicos, tales como la obtención de agua y alimento; regulan las sequías e inundaciones, controlan la calidad del agua, los movimientos en masa y secuestran carbono. Gastezzi-Arias, P., Alvarado-García, V., & Pérez-Gómez, G. (2017).

- **Corredores ecológicos:** Son franjas de vegetación remanente que unen a las áreas protegidas separadas por la edificaciones o mallas viales pavimentadas que permiten el tránsito de especies cumpliendo funciones de: *Ambientales* en la conectividad de ecosistemas para la protección de especies animales y vegetales, *Sociales e*n el enriquecimiento paisajístico de la ciudad con espacios públicos para la recreación *y de Control* de efectos adversos por eventos climáticos extremos como de la calidad del aire, entre otros. Quintero López, N. (2021).

La tabla siguiente muestra las características de estructura y función de la clasificación de corredores ecológicos propuestos por el Jardín Botánico de Bogotá

Tabla 1. *Clasificación propuesta por Van der Ree, R., & Bennett, A. F. (2003). Fuente: Revista Arbelazia Pérez del Jardín Botánico de Bogotá.*

TÉRMINO	ESTRUCTURA	FUNCIÓN
Conector	no necesariamente lineal o continuo	facilita el movimiento de animales o la continuidad de procesos ecológicos a través del paisaje.
Hábitat lineal	forma lineal de vegetación no necesariamente nativa	no necesariamente provee conexión entre dos coberturas vegetales aisladas.
Corredor de hábitat	banda lineal de vegetación	ofrece hábitat que conecta a dos coberturas vegetales aisladas, pero no necesariamente provee refugio a animales
Estribon o nodo	parches separados de hábitat ubicados entre dos coberturas naturales de mayor extensión.	facilita el movimiento y ofrece refugio a los animales.
Conector de Paisaje	gran parche de vegetación a escala de paisaje o región	incrementa la conectividad a escala de región o paisaje.

- **Principio de biodiversidad:** Las estructuras ambientales dentro de la ciudad son necesarias para el tránsito de diferentes especies lo cual puede garantizar una conservación de la estructura y composición de especies, pues de forma directa ayuda a reducir el índice de especies amenazadas de extinción como mamíferos, aves y plantas. Grupo, H. C. (2008).

  Los relictos de bosques que existen en Manizales son propios del ecosistema de bosque húmedo alto andino, de su conservación depende que haya una conectividad entre los diferentes ecosistemas de baja, media y alta montaña. Grupo, H. C. (2008).
- **Principio de servicios ecosistémicos:** En el entorno de ciudad hace falta garantizar unas condiciones mínimas de acceso a diferentes servicios ecosistémicos como: el acceso a los alimentos, a la madera, al aprovisionamiento de agua ya sea desde fuentes superficiales o desde fuentes subterráneas, regulación hídrica, moderación de eventos extremos por precipitación, moderación de inundaciones, prevención de movimientos en masa y regulación de la calidad del aire. Grupo, H. C. (2008).

5.1 Usos de los corredores ecológicos

Estos corredores ecológicos que se conforman en las ciudades podrían servir también como instrumentos para la promoción del geoturismo, como es el caso de Khorramabad , una ciudad en Irán, donde por sus hermosos paisajes y evaluable potencial geomorfológico para los

turistas, se puede desarrollar geoturismo urbano que no ha sido muy estudiado, pues allí hay numerosos, ríos, montañas, cavernas y paisajes erosiónales dentro de la ciudad y alrededor de la misma, este potencial de ecoturismo necesita un reconocimiento , inventario y evaluación para su uso en la educación de las personas en geociencias (Moradipour, F., Moghimi, E., Beglou, M. J., & Yamani, M. (2020).

5.2 Islas de Calor

Los procesos migratorios hacia las capitales, la concentración de la población y su ocupación espacial sobre el territorio hacen que la condición natural se vea modificada drásticamente con obras de infraestructura y elementos que satisfacen las necesidades de la población, esta acción modificadora hace que las ciudades tengan la propiedad de generar sus propias condiciones medioambientales. Villanueva-Solís, J., Ranfla, A., & Quintanilla-Montoya, A. L. (2013)

Las Islas de calor Urbano (UHI) se definen como el aumento de la temperatura de la ciudad respecto a su entorno rural, este fenómeno tiene implicaciones directas en la calidad del aire, salud pública y planeación urbana (EPA. Environmental Protection Agency, 2008). La capacidad de absorción de calor que poseen las edificaciones y el concreto durante el día, y su lenta irradiación nocturna son las variables más fuertes que determinan la anomalía térmica de la

ciudad, por ello las UHI se identifican como temas centrales cuando se habla de mitigación y adaptación ante el *Cambio Climático* desde la perspectiva urbana. Villanueva-Solis, J., Ranfla, A., & Quintanilla-Montoya, A. L. (2013). Los satélites de observación terrestre han permitido a los científicos tener una visión global de este fenómeno a través de la captura de datos climáticos, recopilados durante muchos años a escala global, revelando las señales del *Cambio Climático*.

5.2.1 Razones por las cuales hay ocurrencia de Islas de calor urbana o UHI

- **Geometría urbana:** La geometría de la ciudad, como altura de las edificaciones, separación entre construcciones, distribuciones de espacios verdes, entre otros, pueden afectar patrones de distribución de vientos y absorción de energía generando encausamientos de corrientes de calor que hacen que la distribución de temperatura en la ciudad no sea uniforme. Quiñones, U. M. (2022). Wang, J., Zhou, W., & Wang, J. (2019).
- **Aportes de calor antropogénicos:** los aportes de calor antropogénicos provienen en su mayoría de las actividades económicas que se desarrollan dentro de las urbes, muchas de ellas asociadas a la industria, como metalurgia, procesamiento de hidrocarburos, transporte masivo, entre otros Wang, J., Zhou, W., & Wang, J. (2019).
- **Clima:** Zonas con mayor exposición a la radiación solar, como aquellas donde predominan la baja nubosidad y vientos calmados, influyen en los patrones de circulación de la energía dentro de la ciudad, por lo que cada ciudad es un sistema diferente, incluso

las islas de calor se comportan de forma diferente entre estaciones. Romero D.S., Morales M.C.C.

- **Ubicación geográfica:** Finalmente, algunas características como altura respecto al nivel del mar, cercanía a costas o grandes cuerpos de agua, influyen en los patrones de temperatura de la ciudad. Romero D.S., Morales M.C.C.

5.3 Terminología Geoespacial

- **Resolución Espacial:** Medida del objeto más pequeño que el sensor puede registrar

y que puede ser identificado. Depende del Campo de visión instantáneo por sus siglas en inglés Instantaneous Field of View (IFOV): sección angular observada, valor fijo asociado al sensor, Campo de visión instantáneo en tierra Ground Instantaneous Field of View (GIFOVI): área de terreno que subtiende un ángulo sólido igual a IFOV. GIFOV varía de acuerdo con la altitud del sensor. Asociado a tamaño de píxel – menor objeto mayor resolución

Mayor resolución – Menor área cubierta por una escena. Incide en el nivel de detalle de las imágenes y es necesario tener en cuenta según sea el propósito del proyecto. Chuvieco, E. (1991).

- **Resolución Espectral:** Capacidad del sensor para discriminar diferentes albedos – cantidad de bandas. Ancho de la banda, menor a mayor resolución, mayor a menor resolución. Multiespectral (3 a 10 bandas) – hiperespectral (cientos a miles de bandas) – A mayor cantidad de bandas más precisa la firma espectral Chuvieco, E. (1991).

- **Resolución Radiométrica:** Capacidad del sensor para detectar variaciones en la radiación espectral que recibe. Con mayor resolución mayor precisión de interpretación y clasificación, pero también mayor necesidad de almacenamiento (con 256 niveles se requiere 8 bits es decir un Byte para almacenar un píxel) Número de niveles digitales – niveles grises.

Baja resolución: 2 niveles – blanco y negro – 1 bit Mayor resolución más niveles entre el blanco y negro. Chuvieco, E. (1991).

- Misiones espaciales Landsat:

Los satélites Landsat, vienen equipados con los sensores:

- **Operational Land Imager (OLI):** Mediciones en visible, near infrared, and shortwave infrared portions (VNIR (Visible e infrarrojo cercano), NIR (infrarrojo cercano), and SWIR (Infrarrojo de onda corta)). 9 bandas y pancromática. Precisión radiométrica de 12 bits.

- **Thermal Infrared Sensor (TIRS):** Medición temperatura superficie terrestre en dos bandas (10 y 11) térmicas en sus escenas.

En general los satélites Landsat de los cuales se extrajeron las imágenes satelitales para el desarrollo de parte de esta investigación, cuentan con las siguientes características que se describen en la siguiente tabla:

Tabla 2. *Características de los satélites Landsat 8 & 9*

Satélite	Landsat 8	Landsat 9
Fecha de lanzamiento	11 de febrero de 2013	27 de septiembre de 2021
Sensores principales	OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor)	OLI-2 (Operational Land Imager-2) y TIRS-2 (Thermal Infrared Sensor-2)
Resolución espacial	30 m para bandas espectrales 1-7 y 9; 15 m para banda pancromática; 100 m para bandas térmicas (re-muestreadas a 30 m)	30 m para bandas espectrales 1-7 y 9; 15 m para banda pancromática; 100 m para bandas térmicas (re-muestreadas a 30 m)
Número de Bandas	11 bandas (Bandas 1-9 para OLI y Bandas 10-11 para TIRS)	11 bandas (Bandas 1-9 para OLI-2 y Bandas 10-11 para TIRS-2)
Resolución espectral	Visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta y térmico	Visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta y térmico

Ancho de la escena	185 km	185 km
Resolución temporal	16 días	16 días (coordinado con LANDSAT 8 para proporcionar revisitas cada 8 días)
Resolución radiométrica	12 Bits	12 Bits
Calibración de temperatura	Hasta 53 °C para TIRS	Hasta 65 °C para TIRS-2 (mejora respecto a LANDSAT 8)
Desviación estándar GPS	±12 m (con GPS y modelos de elevación terrestre)	±12 m (mejor precisión gracias a mejoras de calibración)

- **Cima de la Atmósfera O Top Of Atmosphere (TOA):** es una variable física que mide la cantidad de radiación que pasa a través de la parte más alta de la atmósfera, radiancia, reflectancia y TOA en otras palabras, cuando la luz atraviesa la atmósfera y recorre su camino hacia el suelo, la longitud de onda puede dispersarse. Faizan, M. (2020).

- **Análisis Espacial:** El análisis geoespacial geográfico es un proceso de interpretación, exploración y modelización de datos SIG, desde su adquisición hasta el entendimiento del resultado obtenido. La información obtenida se procesa por medio de software específico para análisis espacial, y dependiendo de la finalidad que se quiera obtener, puede ser más o menos complejo. La función más simple sería la de visualización de los datos, mientras que obtener conocimiento útil requiere un análisis exhaustivo de ellos. Chuvieco, E. (1991).

6.Metodología

6.1 Enfoque metodológico

Es una ***investigación mixta cuantitativa y cualitativa***, debido a que involucró el inventario de las áreas de interés ambiental de la ciudad de Manizales. Adicional, se operó *matemáticamente* con las diferentes bandas de las imágenes satelitales para hallar los valores de temperatura de la superficie de la tierra y se utilizó la *estadística* de los valores promedios de temperaturas máximas, medias y máximas para los años 2019 y 2024 de las estaciones de monitoreo hidrometeorológico del programa de investigación ambiental. Con dicha información se hizo un análisis ***cualitativo*** de conceptos técnicos para proponer el posible lugar de conectividad ecológica entre las áreas de interés ambiental basado en los resultados obtenidos de áreas críticas con altas temperaturas y lugares con altos índices de islas de calor.

6.2 Tipo de estudio

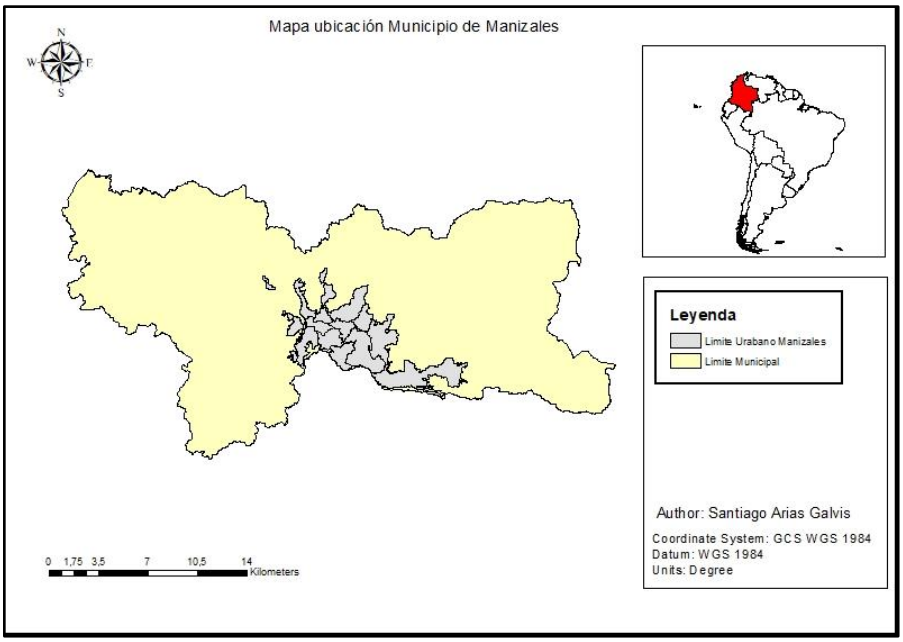
Esta investigación se caracterizó mayormente por ser un ***tipo de estudio cuantitativo descriptivo,*** pues las Islas de calor urbanas ya son un fenómeno que se ha estudiado por diversos autores en diferentes latitudes, al igual que los corredores ecológicos son algo ya estudiado en las ciudades, como también en Manizales hay existencia de ellos, pero en esta investigación las Islas de Calor fueron estudiadas localizadas y medidas con herramientas geoespaciales recientes como los satélites Landsat 9 con sus sensores en el espectro electromagnético del infrarrojo. finalmente, las variables temperatura superficiales del suelo y áreas de interés ambiental se relacionan de forma cualitativa.

6.3 Procedimental

6.3.1 Área de estudio

El municipio de Manizales se encuentra ubicado en el departamento de Caldas en la región del eje cafetero colombiano en el continente sur americano como se muestra en el siguiente mapa.

Fig. 6. *Mapa de ubicación del municipio de Manizales.*



Manizales tiene un área de 571.8 〖Km〗 con una altura media en su área urbana de 2150 metros sobre el nivel del mar, ofrece gran diversidad climática, desde las nieves efímeras del volcán nevado del Cumanday con sus paisajes de páramo, sus bosques alto andinos, hasta el valle en las riberas del río Cauca en los corregimientos del Kilómetro 41 y Santagueda, que poseen climas cálidos, variada vegetación, ríos y quebradas. La temperatura promedio de la ciudad es de 17 °C. Según la clasificación climática de Köppen, la ciudad posee el clima ecuatorial de montaña (Csbi) y la vegetación local es típica de bosque húmedo trópica Alcaldía de Manizales (2015) . El clima en la zona cafetera de Colombia es bimodal identificando dos épocas de lluvias; la primera que va desde marzo a mayo, la segunda de septiembre a noviembre

y dos temporadas más secas de diciembre a febrero y de junio a agosto Duque Escobar, G. (2016). Con la influencia de fenómenos climáticos como El Niño o La Niña, las temporadas secas y de lluvia resultan más intensas respectivamente.

6.3.2 Fuentes de información (fase 1)

Recolección de la información Ambiental

La recolección de la base de datos de los vectores poligonales para cada una de las áreas que comprenden la estructura ecológica urbana de Manizales se extrajo de los datos abiertos del aplicativo SIG de la Alcaldía de Manizales, donde su visualización puede hacerse por medio del geovisor del mismo nombre, y la descarga de los datos puede hacerse por medio de la Application Programing Interface API proporcionada por Empresa Desarrolladora de Sowftware Geoespacial ESRI. Otras de las áreas que se tuvieron en cuenta, fueron las *reservas naturales de la sociedad y los parques nacionales naturales*, la disponibilidad de dicha información se encuentra en el ***Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP)***, la forma de descargarla es a través del geovisor de Parques Nacionales Naturales.

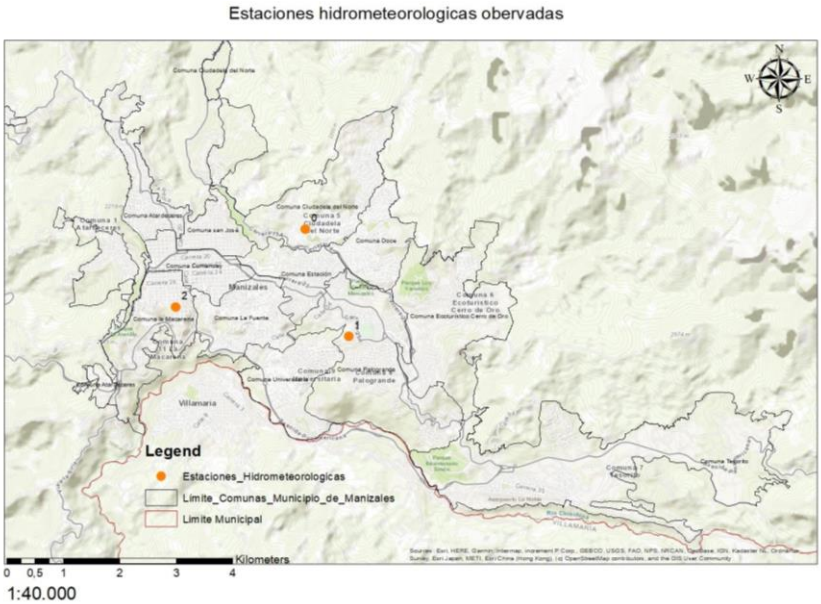
Información sobre Temperaturas de la Ciudad

Para determinar los promedios de temperaturas medias y máximas usadas como determinantes en este estudio de los años 2019 y 2024, se evaluaron las 3 estaciones de monitoreo hidrometeorológicas instaladas por la Corporación Autónoma Regional de Caldas CORPOCALDAS y el Sistema de Monitoreo Ambiental de Caldas (SIMAC) de la Universidad Nacional. Dichas estaciones de monitoreo se eligieron en diferentes lugares de la ciudad a

criterio del investigador, buscando que estuvieran distribuidas en alturas similares entre 2050 y 2150 y que estuvieran ubicadas en o cercanas comunas más densamente pobladas según el DANE siendo las comunas: La Macarena, Ciudadela del Norte y Palogrande.

La siguiente figura muestra algunas de las estaciones hidrometeorológicas estudiadas y ubicadas en Manizales.

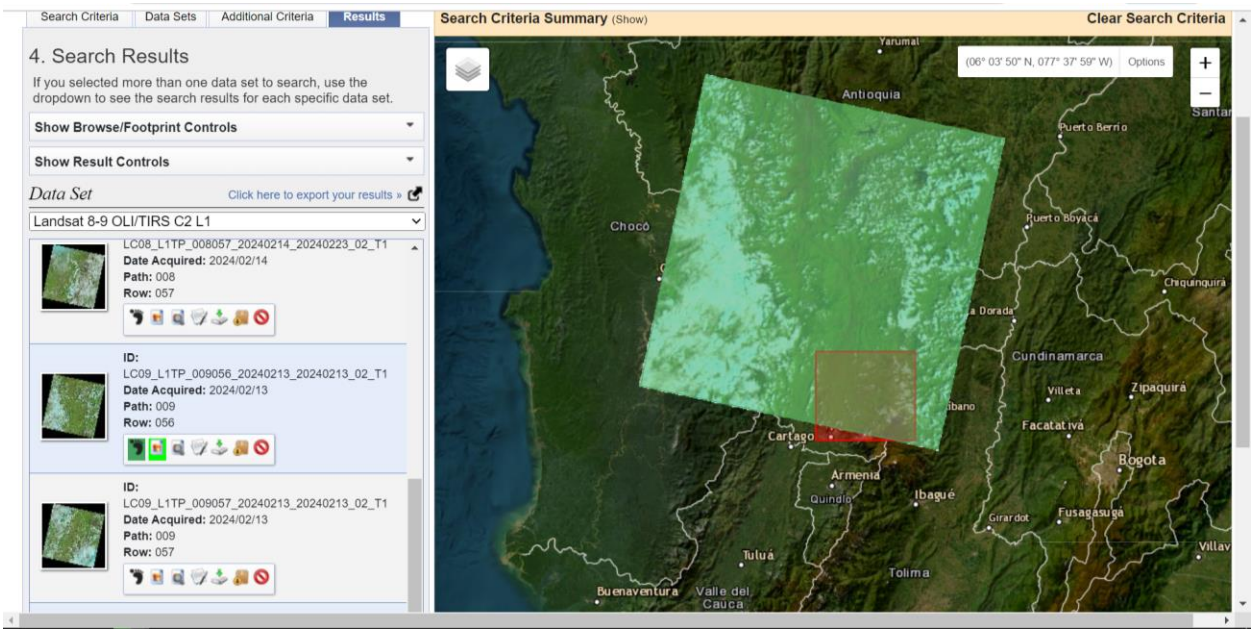
Fig. 7. *Con puntos naranjas se simbolizan las estaciones hidrometeorológicas: con la etiqueta 1. Palogrande (Estación Sede Posgrados), 2. La Macarena (Estación El Carmen) y 0. Ciudadela del Norte (Estación Quebrada el Guamo-lavaderos).*



Herramientas Espaciales usadas

Para el objetivo de este trabajo se usaron imágenes satelitales de los satélites Landsat 8 & 9, extraídas desde el servidor de imágenes Earth Explorer perteneciente al Servicio geológico de los Estados Unidos o USGS por sus siglas en inglés (United States Geological Service), dichas imágenes son multiespectrales que permitan ver el espectro electromagnético en el TIR (Thermal Infrared o infrarrojo térmico) y del NIR por sus siglas en inglés (Near Infrared) o Infrarrojo cercano que oscila entre las longitudes de onda de 770 nm y 2500 nm, en su banda 10 u 11.

Fig. 8. *Criterios de búsqueda en la plataforma Earth Explorer, en rojo la zona de estudio y recuadro más grande en color real es la totalidad de la escena capturada por el satélite.*



6.3.3 Temporalidad del Estudio

En principio las islas de calor urbanas en países con cuatro o dos estaciones definidas afectan más a la población en verano, pero tratándose del trópico, para este caso de estudio en particular, Colombia que cuenta un clima “Bimodal” donde se tuvo en cuenta las temporadas de sol o secas que se repiten cada 3 meses, en condiciones normales y sin la ocurrencia de fenómenos extremos como “El niño” o “La niña” propias de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), dichas temporadas secas ocurren en los meses de diciembre a febrero y de junio a agosto Duque Escoba, G. (2016). Estas condiciones que se replican en la zona de estudio y se tuvieron en cuenta debido a que Manizales presenta altos índices de lluvia por lo tanto de

nubosidad, y dificulta el estudio de islas de calor urbana por medio de sensores remotos ya que se depende de la evaluación de la temperatura del suelo por medio de imágenes satelitales con bajo porcentaje de nubosidad debido a que estas generan distorsión de la información térmica.

Para esta investigación se usaron 2 imágenes satelitales del año 2019 y 2024, Se eligió este intervalo de tiempo porque es lo suficientemente largo para observar cambios en el uso del suelo, la urbanización, el crecimiento de la vegetación o las políticas ambientales tengan un impacto medible en las temperaturas de la superficie**.** finalmente se eligieron imágenes a mediados de la primera temporada seca del año Enero -febrero para poder observar el máximo efecto de la isla de calor, ya que el suelo seco suele incrementar las temperaturas Duque Escobar, G. (2016). Las *imágenes satelitales* se obtuvieron con las características que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. *Características de las imágenes satelitales usadas para la investigación.*

Datum	D_WGS_1984	D_ Bogotá	D_WGS_1984
Sistema de coordenadasProyectadas	COLOMBIA_O_MAGNA_PLANAS	COLOMBIA_O_MAGNA_PLANAS	COLOMBIA_O_MAGNA_PLANAS
Esferoide	WGS_1984	WGS_1984	WGS_1984
Meridiano Central	-75,0 : Greenwich (0,0)	-75,0 : Greenwich (0,0)	-75,0 : Greenwich (0,0)
UTM Zona	WGS_1984_UTM_Zone_18N	WGS_1984_UTM_Zone_18N	WGS_1984_UTM_Zone_18N

Los criterios de ***nubosidad*** para la búsqueda de imágenes en la plataforma de Earth Explorer, se determinaron menores al 70 % debido a que, si se aplican con menor porcentaje de nubosidad, la posibilidad de que salgan resultados nulos es muy alta, ya que en la ZCIT (Zona de Convergencia Intertropical), donde está ubicada la zona de estudio, hay altos porcentajes de nubosidad y lograr imágenes completamente limpias de nubes es una eventualidad. no se encontraron imágenes para un criterio de búsqueda con una cobertura de nubes de menos de 70% en los meses de marzo - mayo o septiembre - noviembre correspondientes a lluvias y exclusivamente para el mes de enero del 2019 se encontró una escena completamente despejada de nubes sobre el cielo de Manizales, por último, se encuentra la imagen de febrero de 2024 con un porcentaje de nubosidad aceptable.

6.3.4 Manejo de información y sistema de referencia para productos cartográficos

La siguiente tabla muestra las características geofísicas y cartesianas usadas en la diferente cartografía que se elaboró para mostrar los resultados, el análisis y las interpretaciones para las diferentes temáticas de esta investigación entre ellas: Mapas de Temperatura Superficial del Suelo o por sus siglas en inglés LST, Mapas de Islas de Calor Urbano o por sus siglas en inglés UHI y Mapas de las Áreas de Interés Ambiental o AIA.

Tabla 4. *Características geodésicas de los productos cartográficos elaborados en la investigación.*

Características	AIA	LST	UHI
Sistemas de coordenadas Geográficas	GCS_WGS_1984 WGS_1984_UTM_Zone_18N WGS_1984_Web_Mercator_Auxiliary_Sphere	GCS_WGS_1984 WGS_1984_UTM_Zone_18N WGS_1984_Web_Mercator_Auxiliary_Sphere	GCS_WGS_1984 WGS_1984_UTM_Zone_18N WGS_1984_Web_Mercator_Auxiliary_Sphere
Datum	D_WGS_1984	D_ Bogotá	D_WGS_1984
Sistema de coordenadas Proyectadas	COLOMBIA_O_MAGNA_PLANAS	COLOMBIA_O_MAGNA_PLANAS	COLOMBIA_O_MAGNA_PLANAS
Esferoide	WGS_1984	WGS_1984	WGS_1984
Meridiano Central	-75,0 : Greenwich (0,0)	-75,0 : Greenwich (0,0)	-75,0 : Greenwich (0,0)
UTM Zona	WGS_1984_UTM_Zone_18N	WGS_1984_UTM_Zone_18N	WGS_1984_UTM_Zone_18N

6.3.5 Construcción de imágenes LST (fase 2)

1. Conversión de ND (Números Digitales) a Top Of Atmosphere TOA Radiansa proveniente de lo más alto de la atmósfera

Las imágenes de los sensores Landsat diferentes se han procesado utilizando mediciones de 32 bits en unidades de radiación absoluta. En el producto terminado de nivel 1, estos valores se convierten a valores enteros de 16 bits. Luego, estos valores se transformaron utilizando los factores de escala de radiancia proporcionados en el archivo de metadatos a radiancia espectral. Para convertir los datos ND del Landsat 8 de la banda 10 en radiancia espectral Faizan, M.

(2020). Se usó la calculadora ráster en ArcGIS 10.8 para obtener este resultado de Top Of Atmosphere para la imagen Landsat 8 & 9, cómo se describe en la siguiente ecuación. Faizan, M. (2020).

Radiance $(L_\lambda) = M_L * Q_{CAL} + A_t$ (2)

Donde.

L_λ = Spectral radiance at the sensor's aperture $\left[\frac{W}{(m^2\ srum)}\right]$

Q_{CAL} = Quantized calibrated pixel value in Digital Number (DN)

M_L = Radiance multiplicative scaling factor for the thermal band

A_t = Radiance additive scaling factor for the thermal band

En la calculadora ráster.

TOA = 0.0003342 * "Band 10" + 0.1

Faizan, M. (2020)

Siendo,

Lambda = TOA

ML= RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04

QCal = ND de banda 10

AL= RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000

- Los valores de ML y AL se encuentran en los metadatos de cada imagen satelital.

Constantes del metadato para ambas imágenes

Tabla 5. *Valores de las diferentes constantes encontradas en el metadato tanto de Landsat 8 como de Landsat 9, entre ellos están K1 y K2 son conocidos como valores de calibración.*

ID imagen	RADIANCE_MULT_BAND_10	RADIANCE_ADD_BAND_10	K1_CONSTANT_BAND_10	K2_CONSTANT_BAND_10
LC09_L1TP_009056_20240213_20240213_02_T1	3.8000E-04	0.10000	799.0284	1329.2405
LC08_L1TP_009056_20190122_20200829_02_T1	3.3420E-04	0.10000	774.8853	1321.0789

2. Conversión de TOA a temperatura de brillo (BT) en °C.

Al momento de calcular el TOA se le resta un Oi que es el valor de la corrección de la banda 10 en imágenes LANDSAT 8, el cual tendría un valor de -0.29 según el cuadro de arriba.

dicha ecuación se ejecuta en el Software ArcGIS 10.8, con su herramienta “Raster Calculator” o “Calculadora Raster” de la siguiente manera:

$$BT = \left(\frac{K_2}{Ln\left(\frac{K_1}{TOA}+1\right)}\right) - 273.15$$

Faizan, M. (2020)

3. Cálculo de Índice de Vegetación Normalizado (NDVI)

Para esta metodología en específico antes de calcular la temperatura de la superficie o Land Surface Temperature por sus siglas en inglés LST se hace necesario calcular el Índice de Vegetación Normalizado o por sus siglas en inglés NDVI, en la uno de los más populares índices de vegetación normalizado, también usando la calculadora ráster con la fórmula que se denota por:

NDVI = (Banda 5 – Banda 4) / (Banda 5 + Banda 4)

Faizan, M. (2020)

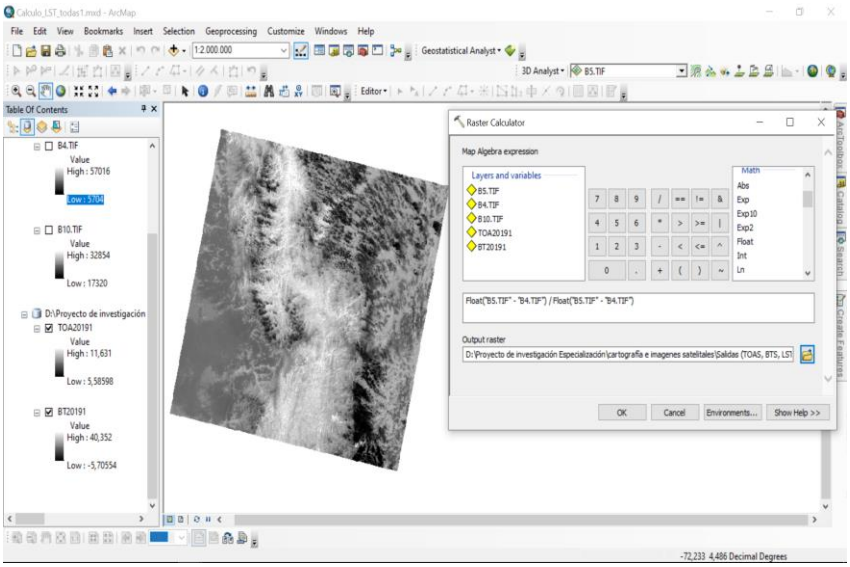
donde,

Banda 5: Infrarrojo cercano (NIR) perteneciente a la imagen ***s***atelital del año evaluado.

Banda 4: Color rojo perteneciente a la imagen satelital del año evaluado.

En la calculadora ráster se hace necesario especificar que los valores de los resultados deben estar en valores flotantes como se muestra en la siguiente imagen del software de procesamiento, porque de lo contrario los resultados aparecerían en valores absolutos por defecto.

Fig. 9. *Ilustración e interfaz de ArcGIS 10.8 con calculadora ráster operando con las diferentes bandas de la imagen satelital.*



4. Cálculo de Emisividad de la Superficie de la Tierra o "Land Surface Emissivity" (LSE)

Es el promedio de emisividad de un elemento de la superficie de la tierra calculado con los valores del NDVI (Índice de vegetación Normalizado). pero primero deben calcular los valores de Proporción de Vegetación (Pv).

Se denota por la fórmula:

$$PV = \left(\frac{(NDVI - NDNI_{min})}{(NDVI_{max} + NDNI_{min})}\right)^2$$

Una vez obtenidos los valores de proporción de vegetación, se procede a calcular los valores de Emisividad (E).

5. Emisividad

Para el cálculo de esta variable se aplicó la fórmula en la calculadora ráster, el valor de 0.986 y 0.004 corresponde a un valor de corrección de la ecuación, el valor de Pv corresponde a la Proporción de vegetación calculada anteriormente y se expresa de la siguiente manera:

E = 0.004 * Pv + 0.986

Faizan, M. (2020)

6. Estimación de LST (Land Surface Temperature)

Para el cálculo de la temperatura superficial del suelo, se usan los valores de Top of Atmosphere Temperatura de Brillo (BT), longitud de onda de la radiancia emitida (simbolizado con Lambda), la cual se encuentra en los datos abiertos de los servidores de los satélites usados, por otro lado la variable C Sub 2 es calculada con base a la constante de Planck, la constante de Boltzmann y la velocidad de la luz, por último también se usa una de las variables ráster calculadas que fue la emisividad de la superficie (E).

$$LST = \frac{BT}{(1 + \left(\frac{\lambda * BT}{C_2}\right) * Ln(E))}$$

Faizan, M. (2020)

Donde,

BT = Top of Atmosphere Brightness Temperature (°C)

⌊ = Wavelength of emitted radiance

E = Land Surface Emissivity

$C_2 = \frac{h*c}{s =} 1.4388 \times 10^{-2} mk =$ **14388 uk**

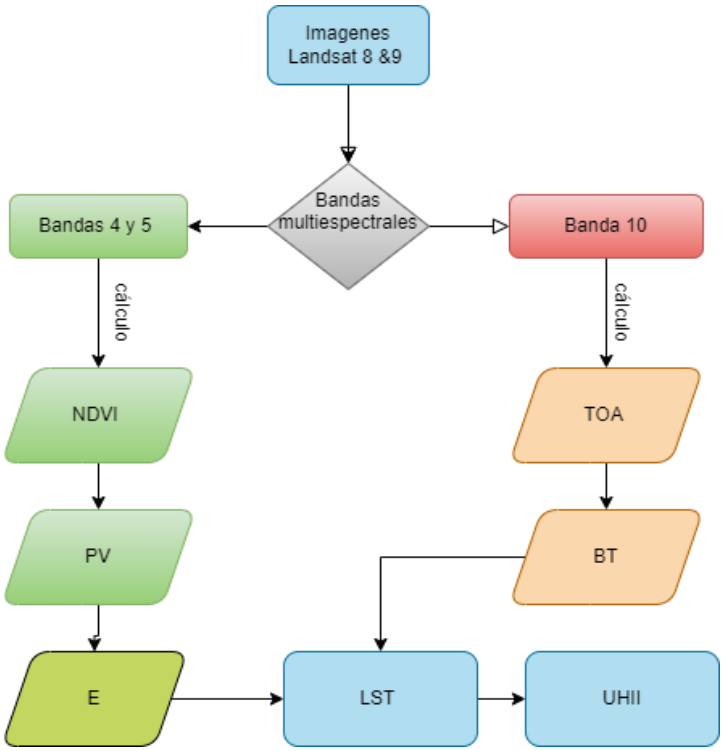
h = Plank´s constant = $6.626176 \times 10^{-34} Js$

s = Boltzmann´s constant =$1.380649 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$

c = Velocity of light = $2.998 \times 10^2 \frac{m}{s}$

Los valores de Lambda⌊, para la banda térmica (banda 10) varían brevemente, dependiendo de la fuente satelital de la imagen, por ejemplo, para Landsat 8 corresponde a □ = 10.8 y para Lasat9 corresponde a 10.89, Finalmente se aplica la fórmula de LST para obtener un mapa de temperaturas superficiales del suelo, cabe señalar que estos valores no corresponden a la temperatura ambiente.

Fig. 10. *Flujo metodológico llevado a cabo en el software de geoprocesamiento para la construcción de las imágenes de temperatura superficial del suelo.*



6.3.6 Identificación de áreas críticas

Para identificar las áreas críticas en la ciudad de Manizales se usaron los datos de temperaturas ambientales máximas promedio para el año 2019 y 2024, proporcionados por las estaciones de monitoreo hidrometeorológicos instaladas por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales y por CORPOCALDAS, como se explicó anteriormente.

En el software de geoprocesamiento ArcGIS 10.8 se reclasifican las imágenes ráster en intervalos de 5 °C hasta llegar al promedio de temperaturas máximas del año correspondiente a la imagen, las áreas que pertenezcan a rangos con temperaturas mayores al promedio registradas este año se van identificar como áreas críticas, lo cual es un abrebocas a la identificación de altos índices de islas de calor urbana o UHII por sus siglas en inglés (Urban Heat Island Index). Para dicha reclasificación se siguieron los siguientes pasos en ArcMap:

1. Clasificar por categorías de rangos de temperatura con la herramienta **“Reclassify”.**
2. Transformar las categorías reclasificadas de temperatura superficiales a una vectorial de polígonos con la herramienta **“Raster to Vector”.**
3. Intersectar los polígonos de las comunas de la ciudad con los polígonos de las categorías de temperatura con la herramienta de geoprocesamiento **“Intersect”**
4. Seleccionar la categoría de interés en la tabla de atributos y crear una capa con dicha selección con **“create layer by selection”.**
5. Resumir los resultados de la categoría de interés por nombres de comuna o por número de comunas y **extraer una tabla para su análisis.**

6.3.7 Elaboración y análisis de los índices de islas de calor urbana (UHI) (fase 3)

Cómo bien se explicó en el marco teórico, una Isla de calor urbana o ICU es un área que es significativamente más cálida que los alrededores en zonas suburbanas, zonas rurales o simplemente relictos boscosos que están dentro o cerca de la ciudad, dichas islas se pueden estudiar desde su intensidad hasta su ocurrencia en la atmósfera, sin embargo

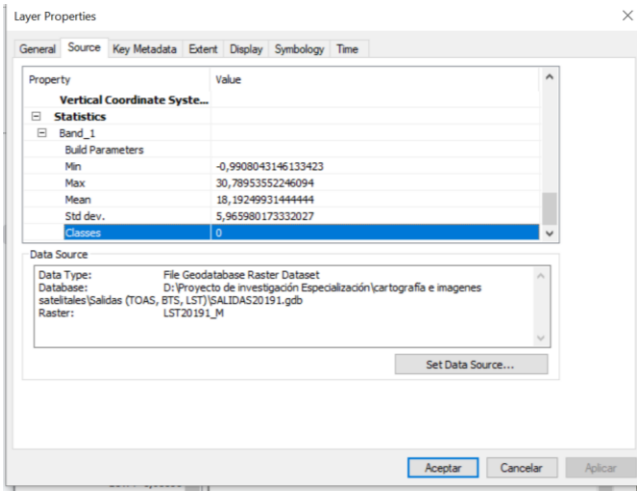
1. Los valores de temperatura para cada imagen se encuentran en las estadísticas, dentro de la propiedades de cada imagen LST, de allí se procede a reemplazar dicho valores en la siguiente ecuación dentro de la ***calculadora ráster,*** donde, ***LST mean*** es el promedio de temperatura de la superficie, ***LST sd*** corresponde a la desviación estándar de la temperatura de la superficie y ***LST*** simplemente es la capa ráster con la que vamos a operar, dichos datos se pueden encontrar en las propiedades de las capa de la siguiente manera en el software properties→ source→ statics.

UHI Index or UHII = $\frac{LST - LST_m}{LST_{sd}}$

LST_m= LST mean

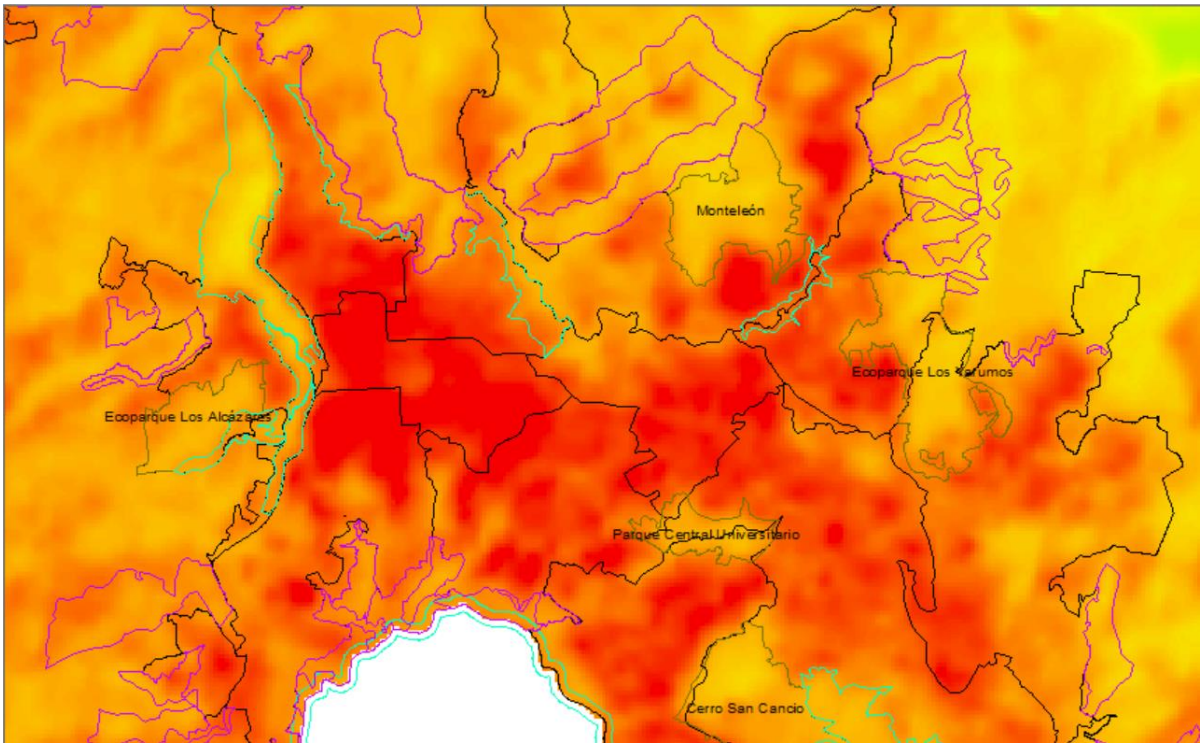
LST_{sd}= LST standard deviation

Fig. 11. *Ejemplo de valores usados para la imagen en el año 2019-1, visualizados en el software ArcGIS 10.8.*



2. Los que nos va a mostrar el ***Índice de Islas de Calor (UHII)*** donde hay gradientes de temperatura altos o bajos, los bajos índices de islas de claro ***(LUHII),*** muestran donde el gradiente de temperatura son más bajos y que para el entendimiento de los productos cartográficos de este trabajo se simbolizaron con **colores amarillo y anaranjados** y los altos índices de islas de calor ***(HUHII)*** muestran donde el gradiente de temperatura es alto o donde hay una alta diferencia de temperatura y a su vez se simbolizaron con colores anaranjados oscuros a rojos.

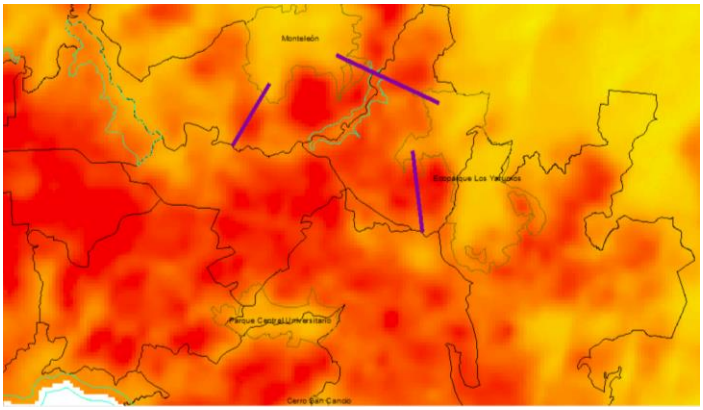
Fig. 12. *Ejemplo de imagen procesada del 2019 donde se muestran gradientes de temperatura bajos asociados a los polígonos de las áreas de interés ambiental de la ciudad en color oliva, menta y fucsia y los gradientes de temperatura altos asociados a tejido urbano.*



3. Para este trabajo en específico se evaluaron 6 transectos para identificar los gradientes en el índice de islas de calor, todos ellos entre áreas de interés ambiental o áreas con potencial para convertirse en el nuevo corredor ecológicos de la ciudad y tejido urbano denso, para las 3 comunas con más concentración de zonas críticas que usualmente son las más densamente pobladas de la ciudad Cumanday, Palogrande y Ciudadela del Norte. Los perfiles nos ayudan a entender dónde están situadas las islas de calor.

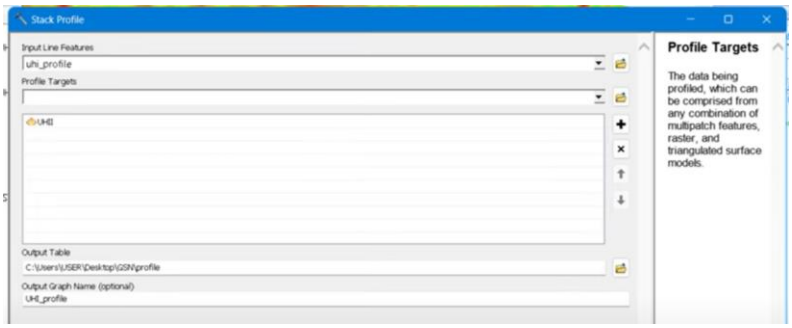
a. Para calcular el perfil o el gradiente de isla de calor de cualquier región dentro del mapa de UHII se crea una capa como polilínea y se edita sobre algún lugar que muestre índices de islas de calor diferenciales o gradientes de temperatura contrastantes.

Fig. 13. *Ejemplo de transectos o perfiles para evaluar la intensidad de los gradientes térmicos entre elementos de la infraestructura ambiental y el tejido urbano continuo.*



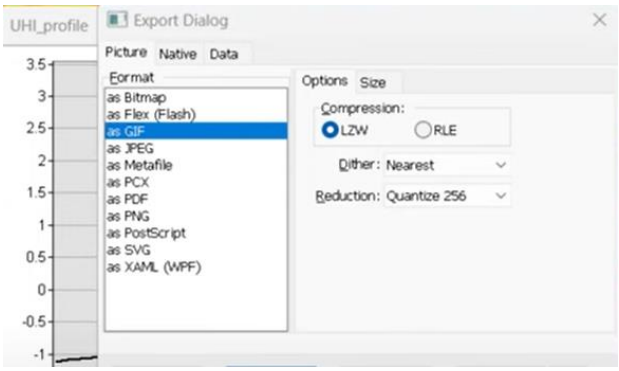
b. Con la herramienta de ArcGIS “Stack Profile”, se construyen gráficas contrastantes para mostrar la existencia o las ocurrencias de Islas de calor según el índice del mapa en cualquier lugar determinado que se hagan los polines, para ello se contrasta la capa UHII (mapa) con UHI profile (línea), como se muestra en la siguiente imagen.

Fig. 14. *Herramienta usada para crear los perfiles de Índices de Islas de Calor Urbana.*



c. Se exporta dicho gráfico como se desee para poner los índices de islas de calor de zonas determinadas en los resultados de este trabajo.

Fig. 15. *Ejemplo de tipo de archivo de exportación para histogramas de índices de islas de calor urbano.*



6.3.8 Propuesta de un nuevo corredor ecológico para la ciudad de Manizales.

Para aportar al mejoramiento de la conectividad de los diferentes elementos de la infraestructura ambiental de la ciudad de Manizales, como también atenuar la problemática ambiental de las Islas de Calor Urbana se propuso un lugar donde podría existir un posible corredor ecológico que cumpla con 3 de los criterios técnicos necesarios para tal fin, entre estos criterios existe el social, espacial y ecológico que se evaluaron bajo postulados conceptuales de la siguiente manera:

1. **Criterio Espacial:** El nuevo corredor ecológico debe fortalecer la conectividad como herramienta de manejo de paisaje de la actual red de ecoparques o de los diferentes elementos que conforman la infraestructura ambiental de la ciudad.
2. **Criterio Social:** Si se entiende que las Islas de Calor Urbana (UHI) son problemáticas ambientales que afectan la calidad de vida de la población por afectaciones de diferentes índoles que ocasiona, entonces el nuevo corredor ecológico debe estar cercano a Comunas que involucren a la mayor cantidad de población posible ya sea por su densidad poblacional o por su tamaño.
3. **Criterio de conservación:** El nuevo corredor de conectividad debe tener un objeto de conservación de especies de flora o fauna dentro de que es un corredor del agua.

El planteamiento de este proyecto, investigación de antecedentes, recolección de la información geoespacial, procesamiento de imágenes satelitales, desarrollo cartográfico y análisis de resultados tuvo un tiempo de ejecución presupuestario de 6 meses, sin embargo

luego se modificó gracias al cronograma cumpliéndose en un plazo total de 7 meses, quedando aproximadamente una actividad por mes; Cabe resaltar, que esta investigación tuvo el alcance solo para informar sobre la problemática ambiental expuesta y sobre posibles medidas de contingencia, pero su ejecución requiere un presupuesto aprobado por voluntades políticas, entidades gubernamentales o no gubernamental, como también un tiempo de ejecución de varios años que involucre todos los actores de la matriz de implicados.

7. Resultados y discusión

En las siguientes páginas se plantea el orden de actividades en que se llevaron a cabo en las cumpliéndose diferentes fases planteadas en la metodología para la obtención de los resultados, dichas actividades se enumeran en la siguiente tabla, y se simbolizan de tal forma que color amarillo corresponde a la FASE 1, el color naranja a FASE 2 y el color rojo a FASE 3.

Tabla 6. *Desarrollo de actividades con sus respectivos resultados. Elaboración propia.*

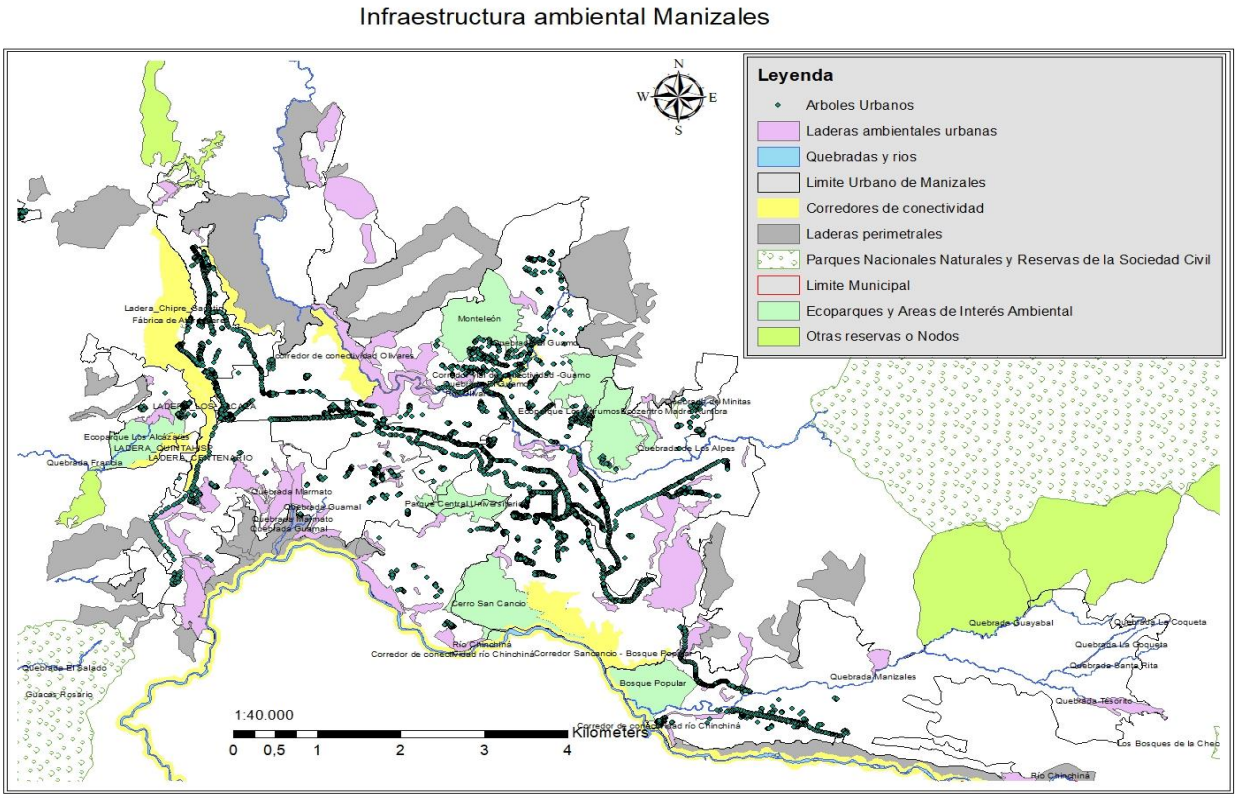
ACTIVIDAD	RESULTADO
Revisión de datos abiertos en geovisores y geodatabases con temáticas ambientales.	Consolidación de mapa con los principales elementos de la infraestructura ambiental de la ciudad.
Revisión de antecedentes y estaciones de monitoreo hidroclimatológico.	Determinantes de temperatura promedio de la ciudad de Manizales en los años 2019 a 2024.
Descarga y procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8 y 9.	Mapas de temperatura superficial del suelo en la ciudad de Manizales.

Análisis de Mapas de temperatura de Manizales.	Tablas de concentración de Áreas críticas por comunas.
Elaboración y análisis de mapas de islas de calor urbana.	Determinación de zonas con altos gradientes térmicos y sus índices de intensidad de islas de calor asociados a su vez con áreas críticas.
Analizar desde aspectos técnicos las islas de calor urbanas, puntos críticos de alta temperatura y áreas de interés ambiental.	Proponer un nuevo trazado de corredor ecológico para la ciudad de Manizales.

7.1 Inventario y reconocimiento de la estructura Ambiental de Manizales (FASE 1)

Dentro de toda la estructura Ambiental urbana de Manizales hay diferentes elementos que la conforman, para esta ciudad uno de esos elementos a veces pasa desapercibido, pero puede llegar a ocupar gran parte de esta, son las laderas ambientales urbanas distribuidas a lo largo y ancho de la ciudad, también se encuentran las laderas ambientales perimetrales características de una ciudad que está construida en las estribaciones de la cordillera central de los Andes Colombianos, entre otros elementos descritos en el siguiente mapa.

Fig. 16. *Mapa consolidado sobre las áreas de interés ambiental de Manizales. Elaboración propia*



El mapa consolidado de la estructura ambiental de Manizales se logra gracias a las diferentes políticas municipales adoptadas por la alcaldía de Manizales en compañía de la corporación autónoma de regional de Caldas (CORPOCALDAS) y políticas nacionales de Parques Nacionales Naturales con sus Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) y el Ministerio de Ambiente. Consolidar dicho mapa cobra relevancia en esta investigación por lo

anteriormente explicado en los antecedentes, donde en la mayoría de ciudades para llegar a analizar la estructura islas de calor urbana, se hace necesario contrastar las temperaturas suburbanas, o rurales con las temperaturas de los tejidos urbanos continuos.

7.1.1 Arborizado urbano.

Según lo consolidado, la ciudad cuenta con aproximadamente 7200, especies de árboles inventariados, los cuales se encuentran en los divisores de las avenidas, parques públicos y jardines urbanos, entre ellos se identifican con su nombre común especies como: Guayacán Amarillo, Palmas Reinas, Eugenias, Acaparros, Yarumos negros, Urapánes, Ficus Cauchoso, etc.

Para alcanzar a dimensionar la proporción de áreas de interés ambiental y demás elementos de la infraestructura ambiental con respecto al área del municipio de Manizales que es de 442,010986 〖Km〗 se presenta la siguiente tabla.

Tabla 7. *Áreas por elemento de la infraestructura ambiental urbana. Elaboración propia.*

Elemento de la Infraestructura ambiental	Área en Kilómetros cuadrados
Quebradas y ríos	6,294293
Laderas Ambientales Urbanas	3,599116
Corredores de conectividad	16,687331
Laderas perimetrales	8,443053
Parques Nacionales Naturales y reservas de la sociedad Civil	70,088479
Ecoparques y Áreas de Interés Ambiental	3,662579

Nodos y otras reservas	20,19907
Total áreas Infraestructura Ambiental	**129,037384**

Se obtiene que la proporción de áreas protegidas o similares en el municipio de Manizales es poco más que la cuarta parte del territorio, sólo la zona urbana de Manizales tiene alrededor de 35,796672 〖Km〗, aunque aparentemente el área total de la Infraestructura ambiental supera en casi 4 veces el área urbana, dicha infraestructura se encuentra por fuera del área urbana.

7.2 Temperaturas en estaciones hidrometeorológicas (FASE1)

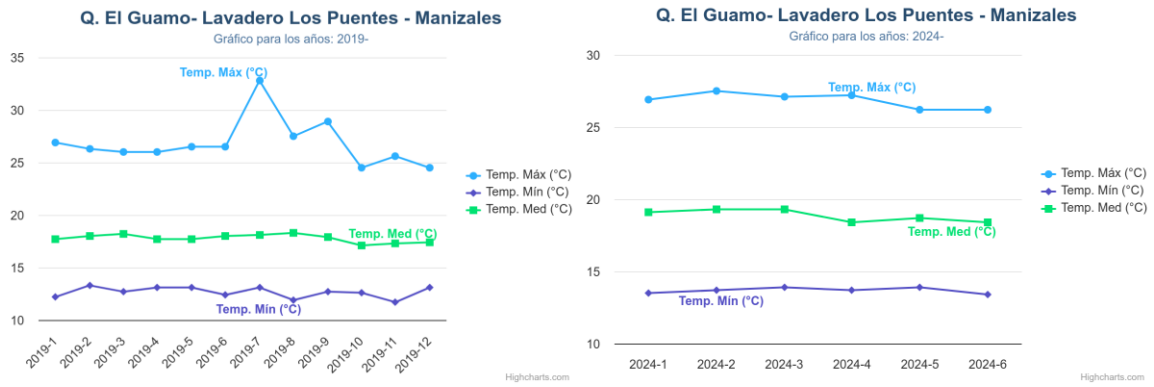
A continuación, se enlistan las 3 estaciones evaluadas con sus características y lecturas de temperaturas promedio para los años 2019 y 2024, que se eligieron buscando una distribución simétrica en la ciudad y cercanas o pertenecientes a las comunas más pobladas.

1. ***Estación en comuna Ciudadela del Norte***

Para esta comuna se evaluó la estación hidrometeorológica con el nombre de “Quebrada el Guamo, Lavadero Los puentes”, en el año 2019 para los 12 meses y en 2024 se obtuvieron registros de solo hasta el mes 6, como se muestra en los siguientes histogramas donde se observa

en azul las temperaturas promedias máximas, en verdes las temperaturas promedias medias y en morado las temperaturas promedias mínimas.

Fig. 17. *Histogramas de temperaturas estación Ciudadela del norte*



Estas temperaturas promedias máximas para el año 2019 y 2024 fueron las tenidas en cuenta para establecer categorías de temperatura y en la evaluación de islas de calor, obteniéndose los siguientes resultados expresados en la siguiente tabla extraída de los datos de la estación “Quebrada el Guamo, Lavadero Los puentes”.

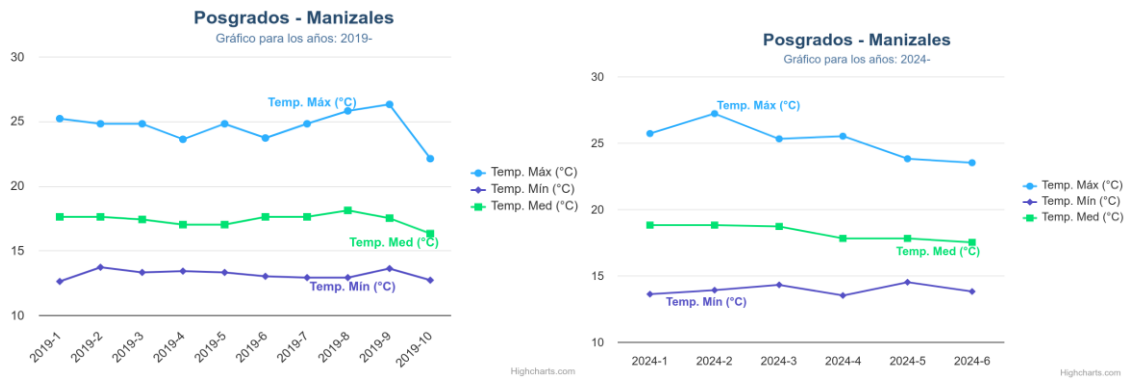
Tabla 8. *Valores de temperatura promedios máximos obtenidos de la estación hidrometeorológica "Quebrada el Guamo, Lavadero Los puentes" para los años evaluados.*

ID	X	Y	h	Año	TMáx (ºC)	TPro (ºC)
Est_Guamo	-5,0736656	-75,499106	2032	2019	26,9	17,8
Est_Guamo	-5,0736656	-75,499106	2032	2024	27,5	18,9

2. Estación en comuna Palogrande

Para esta comuna se evaluó la estación hidrometeorológica con el nombre de "Postgrados", en el año 2019 para los 12 meses y en 2024 se obtuvieron registros de solo hasta el mes 6, como se muestra en los siguientes histogramas, donde se observa los en azul las temperaturas promedias máximas, en verdes las temperaturas promedias medias y en morado las temperaturas promedias mínimas.

Fig. 18. Histogramas de temperaturas estación Posgrados.



Estas temperaturas promedias máximas para el año 2019 y 2024 fueron las tenidas en cuenta para establecer categorías de temperatura y en la evaluación de islas de calor, obteniéndose los siguientes resultados expresados en la siguiente tabla extraída de los datos de la estación.

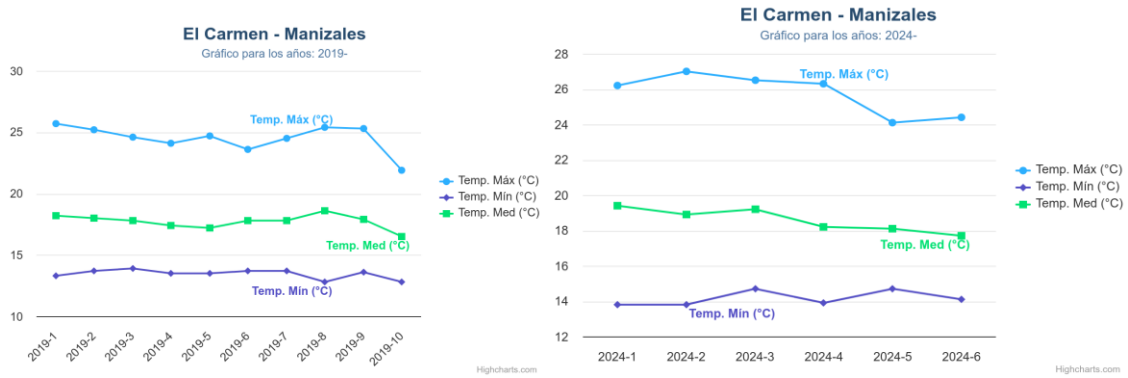
Tabla 9. *Valores de temperatura promedios máximos obtenidos de la estación hidrometeorológica "posgrados" para los años evaluados.*

Año	TMáx (ºC)	TMin (ºC)	TPro (ºC)
2019	26,3	12,6	17,4
2024	27,2	13,5	18,3

3. Estación Comuna La Macarena

Para esta comuna se evaluó la estación hidrometeorológica con el nombre de "El Carmen", en el año 2019 para los 12 meses y en 2024 se obtuvieron registros de solo hasta el mes 6, como se muestra en los siguientes histogramas, donde se observa en azul las temperaturas promedias máximas, en verdes las temperaturas promedias medias y en morado las temperaturas promedias mínimas.

Fig. 19. *Histogramas de temperaturas para la estación La Macarena*



Estas temperaturas promedias máximas para el año 2019 y 2024 fueron las tenidas en cuenta para establecer categorías de temperatura y en la evaluación de islas de calor, obteniéndose los siguientes resultados expresados en la siguiente tabla extraída de los datos de la estación “El Carmen”.

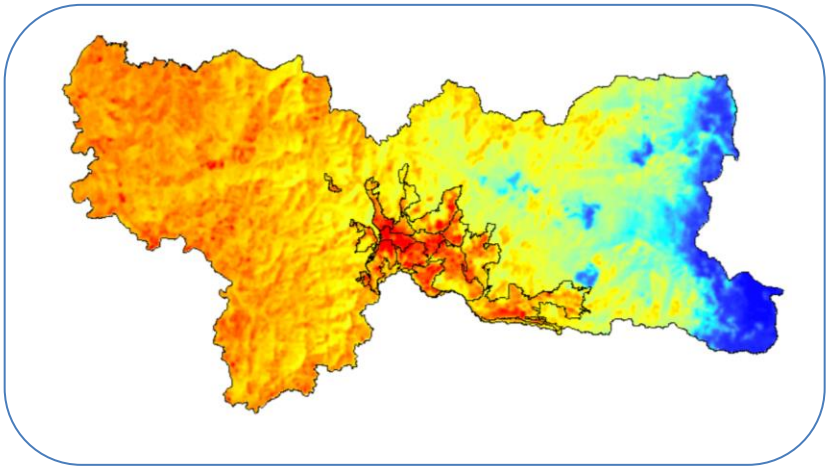
Tabla 10. *Valores de temperatura promedios máximos obtenidos de la estación hidrometeorológica "postgrados" para los años evaluados.*

Año	TMáx (ºC)	TMín (ºC)	TPro (ºC)
2019	25,7	12,8	17,7
2024	27	13,8	18,6

7.3 Temperaturas superficiales del suelo (FASE 2)

Los mapas de temperatura superficial del suelo obtenidos para ambos años evaluados se obtuvieron con imágenes satelitales con el menor porcentaje de nubes posible, sin embargo para poder evaluar estas temperaturas con la información más reciente y por la temporalidad que pretendió esta investigación, no hubo disponibilidad de una imagen satelital completamente libre de nubes sobre la ciudad de Manizales para el año 2024, a diferencia de la imagen del año 2019 que contaba con muy bajo o casi nulo porcentaje de nubes sobre la zona urbana. Para la interpretación de ambos mapas LST se debe entender que los colores rojos corresponden a altas temperaturas, los colores naranjas a temperaturas medias, los colores amarillos y azules a temperaturas más bajas que las mencionadas.

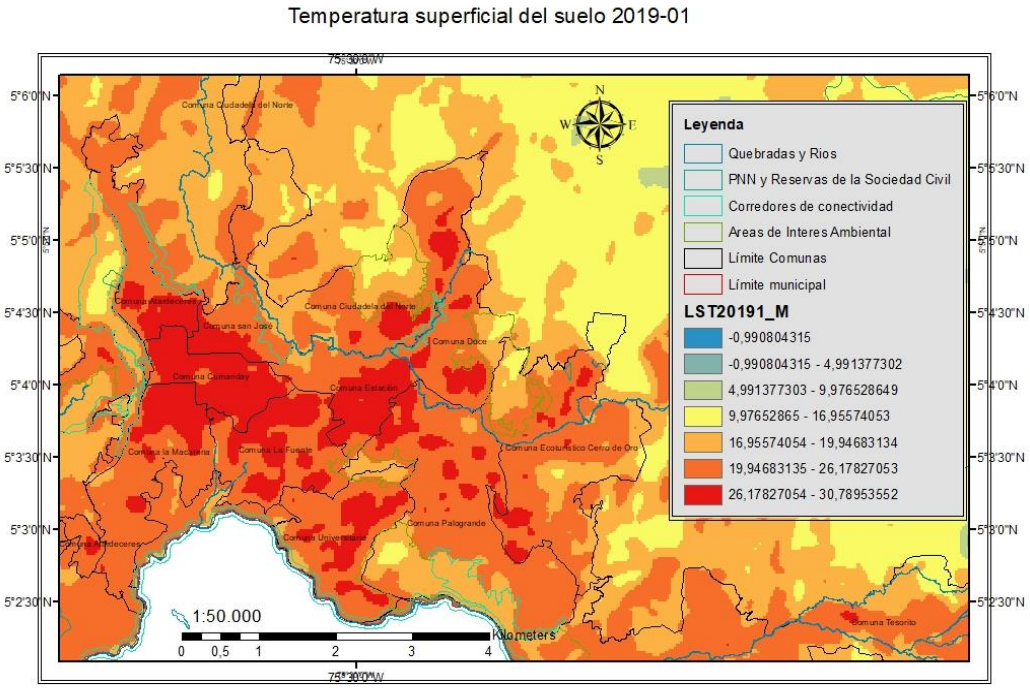
Fig. 20. *Delimitación y recorte de imagen de temperatura de la superficie para el municipio de Manizales, en rojo se identifican las zonas con más altas temperaturas (la zona urbana del municipio se mostró con altas temperaturas con respectos las áreas circundantes)., a diferencia de las áreas en azul que muestran temperaturas bajas.*



7.3.1 Mapa de Temperaturas superficiales del suelo para 2019

Para la construcción de este mapa se usó una imagen satelital del satélite Landsat 8, tomada en enero de este año, la cual concuerda con el postulado de evaluar dichas temperaturas superficiales para las temporadas secas del año. Las temperaturas obtenidas en el siguiente mapa van desde los aproximadamente -1 °C, posiblemente asociado a las partes altas de la montaña o alguna nubosidad presente, hasta los 30,78 grados, usualmente asociadas a las superficies del tejido urbano continuo como cubiertas, asfalto, entre otros y algunos lugares rurales cercanos al valle del río Cauca donde la altura también cumple un papel importante en los cambios de temperatura.

Fig. 21. *Mapa de temperaturas superficiales del suelo para enero del 2019 en la ciudad de Manizales.*

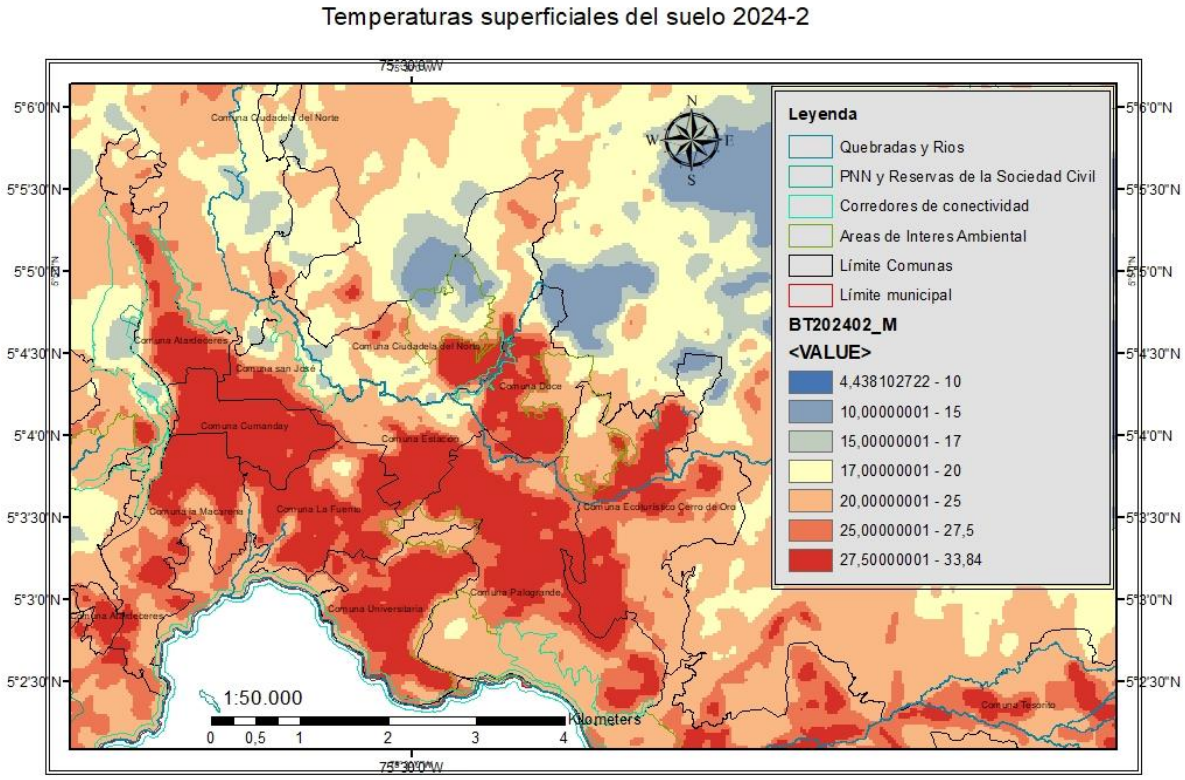


Lo que se logra observar en el mapa es que las zonas correspondientes a algunos de los elementos de la infraestructura ambiental municipal como los ecoparques y corredores de conectividad están asociados a temperaturas más bajas entre 16 y 20 ℃.

7.3.2 Mapa de Temperaturas superficiales del suelo para 2024

Para la construcción de este mapa se usó una imagen satelital del satélite Landsat 9, tomada en febrero de este año, la cual concuerda con el postulado de evaluar dichas temperaturas superficiales para las temporadas secas del año. Las temperaturas obtenidas en el siguiente mapa van desde los aproximadamente 4 ℃, posiblemente asociado a las partes altas de la montaña o alguna nubosidad presente sobre algunos de los elementos de la infraestructura ambiental Municipal que también suelen estar en partes altas de la ciudad, hasta los 33,84 grados, usualmente asociadas a las superficies del tejido urbano continuo como en la Comuna Cumanday donde funciona mucha de la vida corporativa, comercial y de transportes de la ciudad, también algunos lugares rurales cercanos con temperaturas altas posiblemente asociadas a deforestación, crecimiento suburbano, entre otros.

Fig. 22. *Mapa de temperaturas superficiales del suelo para febrero del 2024 en la ciudad de Manizales.*



Se logra observar dentro de la ciudad algunas áreas con temperaturas anormalmente bajas, siendo inferiores a 10 °C, pero *esto se explica por el mismo porcentaje de nubes con que se obtuvo la imagen satelital evaluada, lo cual no compromete el objeto de este estudio*. sin embargo, dichas nubes casualmente se posicionan sobre algunos de los elementos de la infraestructura ambiental como corredores de conectividad, laderas ambientales urbanas y ecoparques.

7.3.4 Análisis comparativo entre las temperaturas superficiales del suelo entre el 2019 Y 2024

Después de hacer una comparación entre los valores máximos de temperaturas registradas en la ciudad para ambos años, se observó que para el *2019 el registro máximo fue de 30.78 ℃*, en cambio para el *2024 se obtuvo un registro de temperatura máxima de 33, 84.* Como también se compraron los registros de temperatura promedio máxima, como criterio evaluativo para determinar zonas críticas donde para el 2019 se ubicó en 26,17 y para el 2024 en 27.5, lo que nos muestra un aumento de poco más de 1 grado centígrado en los promedios máximos de temperatura de la ciudad en un quinquenio.

7.4 Zonas críticas de altas temperaturas por comunas de Manizales. (FASE 2)

Basta con observar los mapas de temperaturas de ambos años para darse cuenta que las zonas críticas en color rojo, han aumentado de tamaño en 2024 con respecto a su misma temporada en 2019 y probablemente en intensidad, se observan las zonas críticas desde su concentración por comunas, para ambos años se logra distinguir que la comuna Cumanday tiene gran parte de su área ocupada por zonas críticas y seguramente es la comuna con más concentración de áreas críticas por altas temperaturas de toda la ciudad, no es de sorprenderse debido a que también según el inventario propuesta de la infraestructura ecológica urbana, es una

de las comunas que menos posee de este tipo de infraestructura. En la siguiente tabla se muestran las diferentes comunas con su cantidad de áreas críticas por año.

Tabla 11. *Cantidad de áreas críticas, su área en kilómetros cuadrados por comuna.*

# comuna	Nombre Comuna	# Áreas críticas 2019	Sum áreas Km^2 2019	# Áreas críticas 2024	Sum áreas 〖Km〗 2024
1	Comuna Atardeceres	3	0,463561641	9	0,68680778
2	Comuna Ciudadela del Norte	5	0,406505521	2	0,333579872
3	Comuna Cumanday	1	1,064698577	1	1,130618905
4	Comuna Doce	3	0,273241702	1	0,664709843
5	Comuna Ecoturístico Cerro de Oro	9	0,25981916	5	1,121007561
6	Comuna Estación	1	0,693782508	2	0,542842103
7	Comuna La Fuente	3	0,901880182	3	1,100362959
8	Comuna la Macarena	6	0,631592046	7	0,922562184
9	Comuna Palogrande	12	0,476488014	3	1,860349966

10	Comuna san José	1	0,288077205	1	0,253395804
11	Comuna Tesorito	5	0,48742074	17	2,147468657
12	Comuna Universitaria	5	0,586207471	3	1,121673956
	Áreas totales 〖Km 〗 y número de áreas	54	6,533274769	54	11,88537959

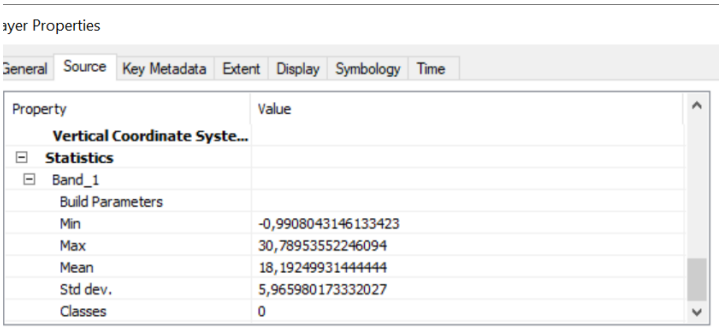
Cabe recordar que estas áreas críticas se determinaron con las temperaturas registradas en las estaciones de monitoreo hidro climatológico evaluadas, donde para el año 2019 la temperatura fue de 26,17 ℃ y para el año 2024 se definieron dichas áreas críticas aquellas zonas que poseían temperaturas por encima de 27,5 grados centígrado, lo que también evidencia un aumento de las temperaturas promedio y un posible agravamiento en la ocurrencia e intensidad de las islas de calor urbana, Finalmente se obtiene que para Enero del 2019 se presentaba un área total de zonas críticas de hidro climatológico 6,53 〖Km〗 , mientras que en febrero del 2024 en el marco del fenómeno del niño se presentan un total de áreas de zonas críticas de 11,89 〖Km〗, casi duplicando los resultados de los registro 5 años atrás con temperaturas superficiales que ya superan los 33,84 ℃.

Se analizó que las comunas con mayor concentración de zonas críticas después de la Comuna Cumanday para el 2019 fueron La Fuente, La Estación y La Macarena. y para el 2024 fueron: Tesorito, Palogrande y Universitaria a diferencia del año 2019, estos valores se vieron alterados por las nubes en la imagen.

7.5 Cálculo de Índices de Islas de Calor (FASE 2)

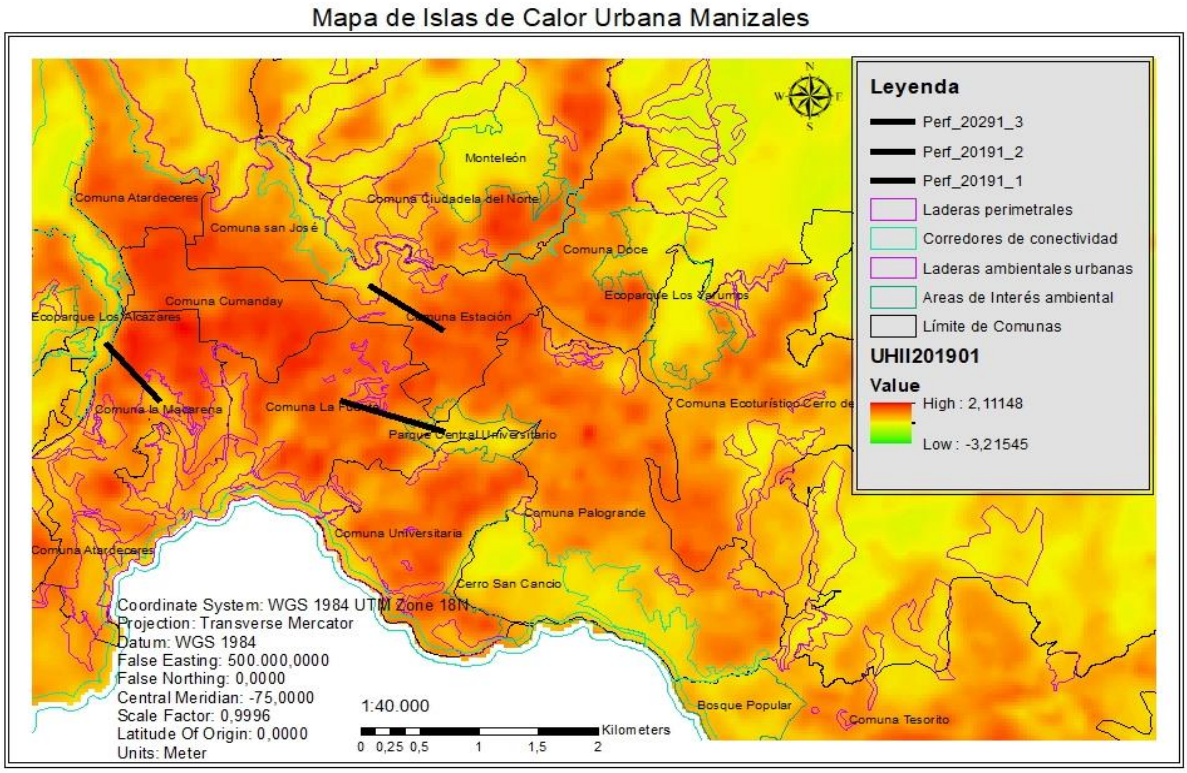
Para analizar las islas de calor urbanas se evaluaron las 3 secciones por cada año entre las comunas más críticas y diferentes elementos de la infraestructura ambiental como se muestra en el siguiente mapa con el fin de contrastar los gradientes térmicos de estas islas de calor en lugares puntuales de la ciudad y para la construcción del mapa de isla de calor se usaron los valores de temperatura media, como también desviación estándar de la imagen LST como se muestra en la siguiente figura.

Fig. 23. *Valores de desviación estándar y temperatura media usados en la ecuación de índices de islas de calor (UHII) para enero del 2019.*



Cabe resaltar que para la interpretación de los mapas de UHI los colores rojos se asocian a altos gradientes térmicos o a la existencia de UHI, en cambio los colores amarillos y verdes se asocian a neutrales y bajos gradientes térmicos o a la posible inexistencia de UHI

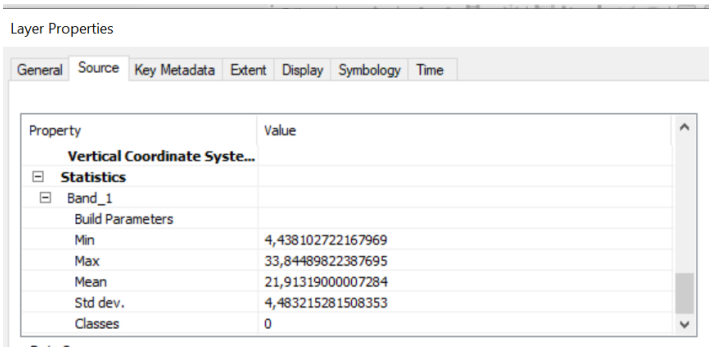
Fig. 24. *Mapa de Islas de Calor Urbano UHI en el municipio de Manizales para el año 2019. Elaboración propia.*



Para el año 2024 la media de temperatura del suelo para el municipio aumentó en casi en 4 ℃ posicionándose en 21,9 ℃ a en contraste con la temperatura media de 2019 que fue de

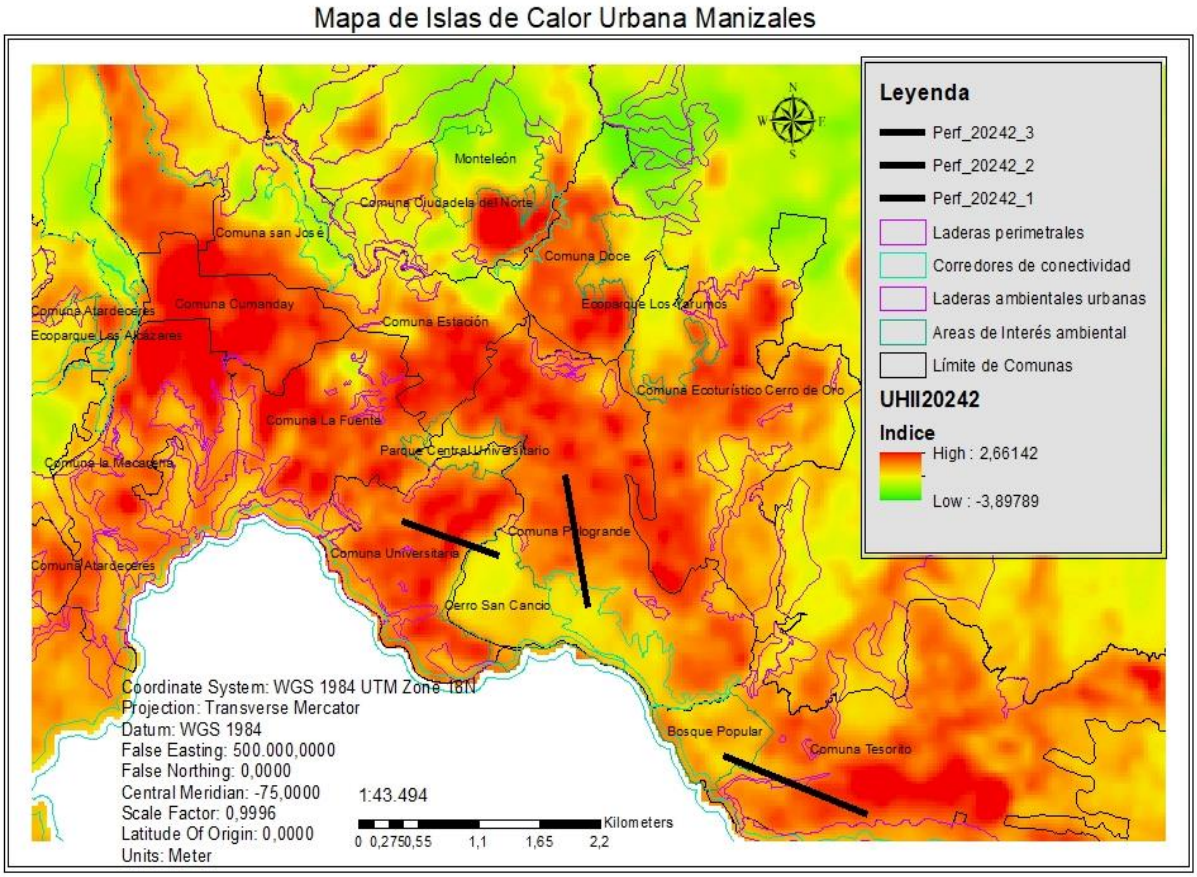
18,19 °C, los gradientes térmicos también aumentaron en 2024, al igual que los Índices de Islas de Calor en toda la ciudad evidenciados en los transectos evaluados debido a que se alcanzaron UHII de hasta 2.2

Fig. 25. *Valores de desviación estándar y temperatura media usados en la ecuación de índices de islas de calor (UHII) para febrero del 2024.*



Property	Value
Vertical Coordinate Syste...	
Statistics	
Band_1	
Build Parameters	
Min	4,438102722167969
Max	33,84489822387695
Mean	21,91319000007284
Std dev.	4,483215281508353
Classes	0

Fig. 26. *Mapa de Islas de Calor Urbano UHI en el municipio de Manizales para el año 2024.*



7.5.1 Perfiles evaluados de Índices de Islas de Calor Urbano (UHII) (FASE 2)

Para la interpretación de los perfiles UHII se debe entender que los valores positivos (+) corresponden a altos gradientes térmicos asociados a Islas de Calor Urbana ICU, los valores cercanos a cero (0), son interpretados como valores neutrales donde hay una transición o no se ha desarrollado una UHI, por último, los valores (-) están asociados a lugares donde en gradiente térmico es bajo o a la no existencia de UHI

Se encontró que para ambos años tanto para el 2019 y el 2024 los UHII oscilaron entre los -0.3 hasta 2.2, predominando los valores positivos que indican altos gradientes térmicos. Para el 2019 se encontraron valores de UHII menores a los del 2024.

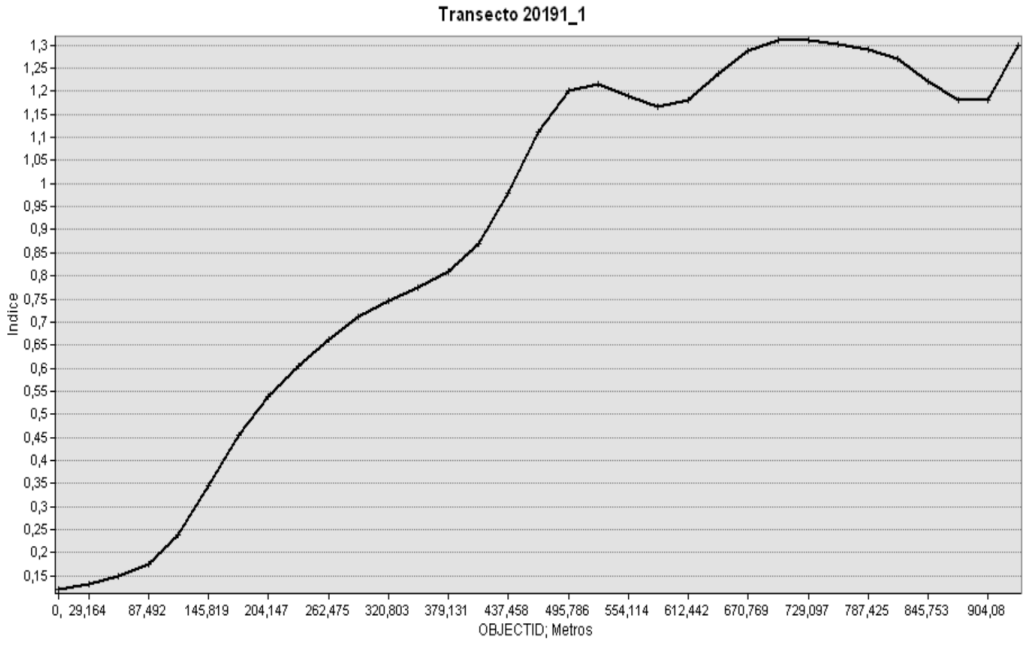
Perfiles evaluados en 2019

La diferencia de gradientes térmicos entre elementos de la infraestructura ambiental urbana y el tejido urbano continuo en las comunas La Fuente, La estación y La Macarena fue evidente, como se muestra en los siguientes histogramas elaborados a partir de los transectos propuestos en el mapa de UHI 2019 mostrado.

El histograma que se muestra continuación (**Fig. 27**) muestra la tendencia de índices de isla de calor para un transecto de 900 metros aproximadamente como se muestra en la ***figura 25,*** evaluado entre lo que corresponde a tejido urbano continuo dentro de la comuna La Fuente y el Parque Central Universitario o Jardín Botánico de la Universidad de Caldas, lo que se observa es que en los primeros 400 metros del transecto evaluado cercanos a la zona boscosa

correspondiente al jardín botánico los valores de UHII no superan el 1, mientras cuanto más se alejan dichos valores incrementan con algunas inflexiones de caída de índices de islas de calor urbana debido a que el transecto evaluado también pasa por algunas áreas que corresponden a laderas ambientales urbana.

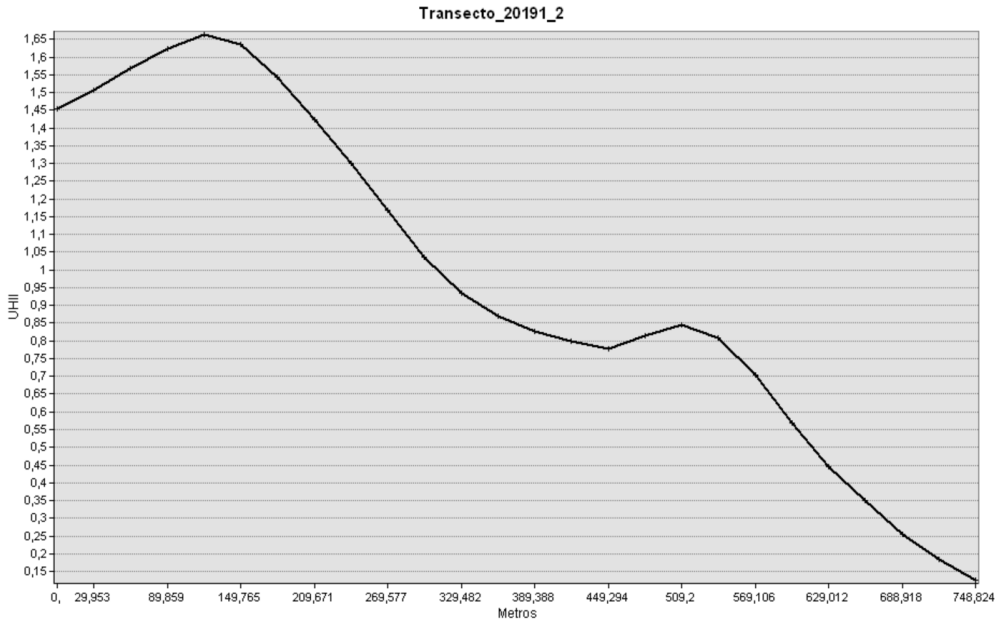
Fig. 27. *Histograma para el transecto desde tejido urbano continuo en la comuna La Fuente y el jardín botánico de la universidad de caldas o Parque central Universitario.*



El histograma que se muestra continuación (**Fig. 28**) muestra la tendencia de índices de isla de calor para un transecto de 750 metros aproximadamente como se muestra en la ***figura 25,***

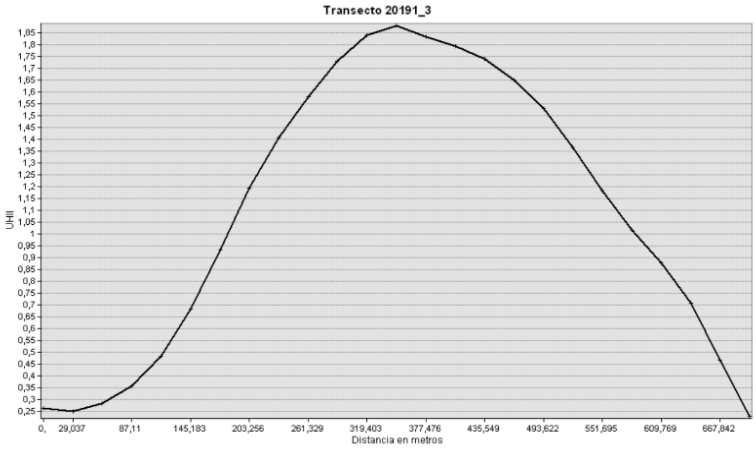
evaluado entre lo que corresponde a tejido urbano continuo dentro de la comuna La Estación y las laderas ambientales urbanas que hacen parte de la infraestructura ambiental de la ciudad, lo que se observa es que en los primeros 90 a 150 metros del transecto y entre los últimos 450 a 550 metros evaluados, hay unos picos de índices de islas de calor urbana UHII asociados a zonas densamente pobladas o urbanizadas, sin embargo el primer pico es más agravado que el segundo, porque el segundo pico se encuentra en la parte del transecto que más cerca se encuentra las zonas boscosas pertenecientes a las laderas ambientales urbanas o laderas perimetrales.

Fig. 28. *Histograma para el transecto desde tejido urbano continuo en la comuna La Estación y relictos boscosos correspondientes a laderas ambientales urbanas o a las riberas de la quebrada Olivares.*



El histograma que se muestra continuación (**Fig. 29**) muestra la tendencia de índices de isla de calor para un transecto de 670 metros aproximadamente como se muestra en la ***figura 25,*** evaluado entre lo que corresponde a un corredor de conectividad al occidente dentro de la comuna La Macarena, pasando por tejido urbano continuo dentro de la kisma comuna y terminando en las laderas ambientales urbanas que hacen parte de la infraestructura ambiental de la ciudad, lo que se observa es que a medida que el transecto evaluado se aleja de las áreas de interés ambiental, los índices de islas de calor aumentan UHII hasta valores de 1.8, lo que arrojaría que la comuna La Macarena presenta uno de los UHII más altos para las evaluaciones puntuales hechas en los transectos para el año 2019.

Fig. 29. *Histograma para el transecto desde tejido urbano continuo en la comuna La Macarena y relicto boscoso correspondiente a ladera ambiental urbana de "La Escombrera- El Bosque".*

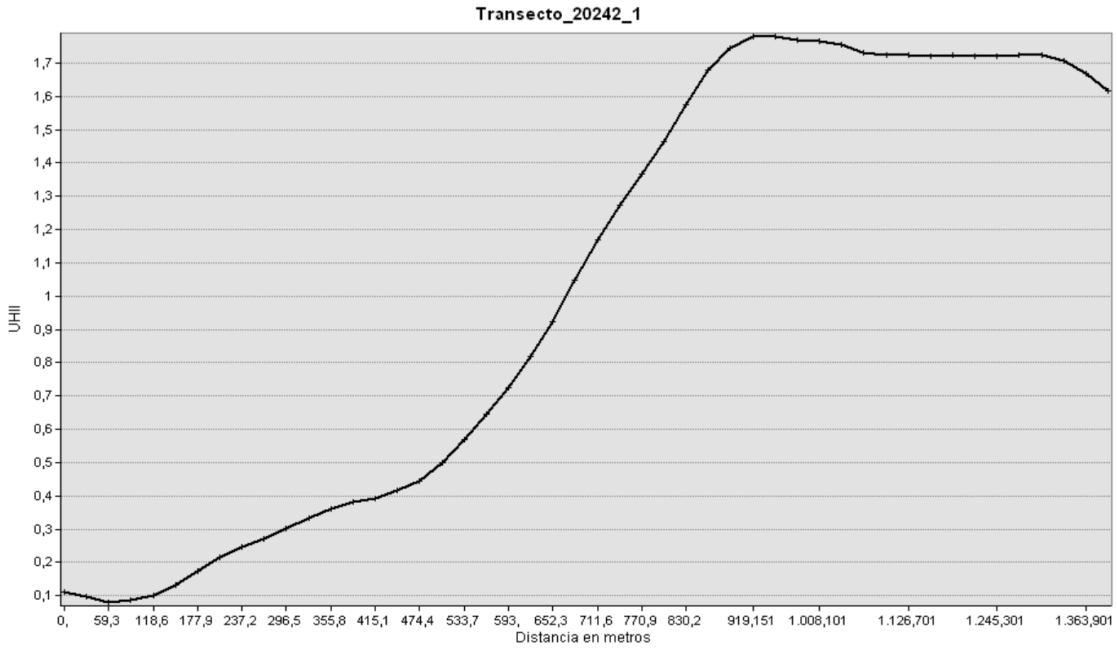


Perfiles evaluados en 2024

La diferencia de gradientes térmicos entre elementos de la infraestructura ambiental urbana y el tejido urbano continuo en las comunas Tesorito, Palogrande y Universitaria fue claro, como se muestra en los siguientes histogramas elaborados a partir de los transectos propuestos en el mapa de UHI 2024 (**Fig. 26**). Por último, para este análisis de perfiles en el año 2024 se encontró un gradiente térmico más amplio, que podría estar relacionado con la presencia de nubosidad, la diferencia de lugares en que los transectos fueron propuestos o también como un efecto generalizado del cambio climático.

El histograma que se muestra continuación (**Fig. 30**) muestra la tendencia de índices de isla de calor para un transecto de 1360 metros aproximadamente como se muestra en la ***figura 26,*** evaluado entre lo que corresponde a un área de interés ambiental ecoparque “Bosque Popular” al oriente de la ciudad y un área de tejido urbana continua dentro de la comuna Tesorito, los índices de islas de calor aumentan UHII alcanzan valores máximos de hasta 1.8, siendo equiparable con los máximos encontrados en el año 2019.

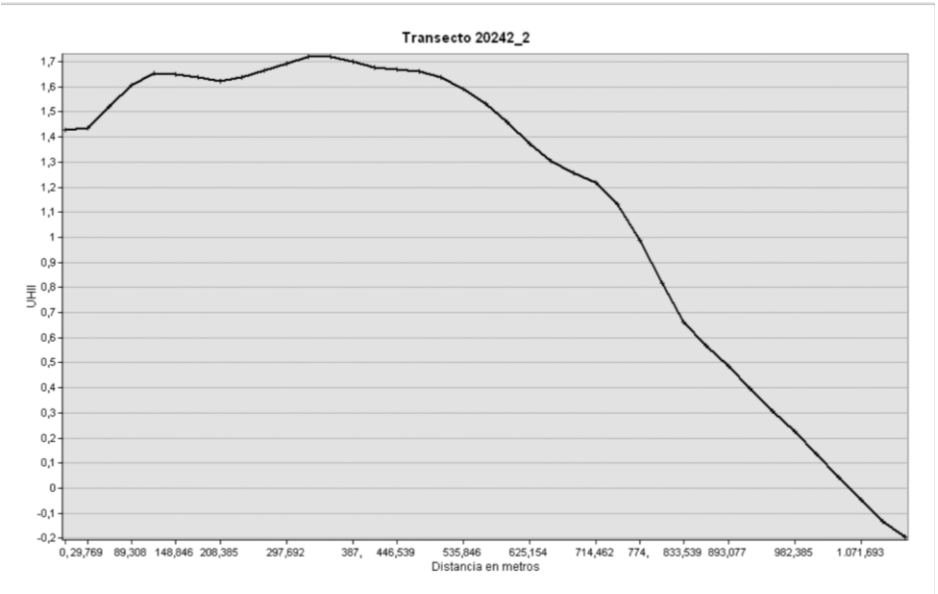
Fig. 30. *Histograma para el transecto desde tejido urbano continuo en la comuna Tesorito y el área de interés ambiental "Bosque Popular".*



El histograma que se muestra continuación (**Fig. 31**) muestra la tendencia de índices de isla de calor para un transecto de 1100 metros aproximadamente como se muestra en la ***figura 26,*** evaluado entre lo que corresponde a un área de conectividad al sur y varias área de tejido urbana continua dentro de la comuna Palogrande, los índices de islas de calor aumentan UHII alcanzan valores máximos de hasta 1.7 lo que serían elevados, cabría destacar que en la parte del transecto evaluada que está sobre la zona de conectividad al sur de la ciudad, se encuentra uno

de los valores más bajos registrados para todas las evaluaciones puntuales realizadas, debido a valores de -0.2 de UHII.

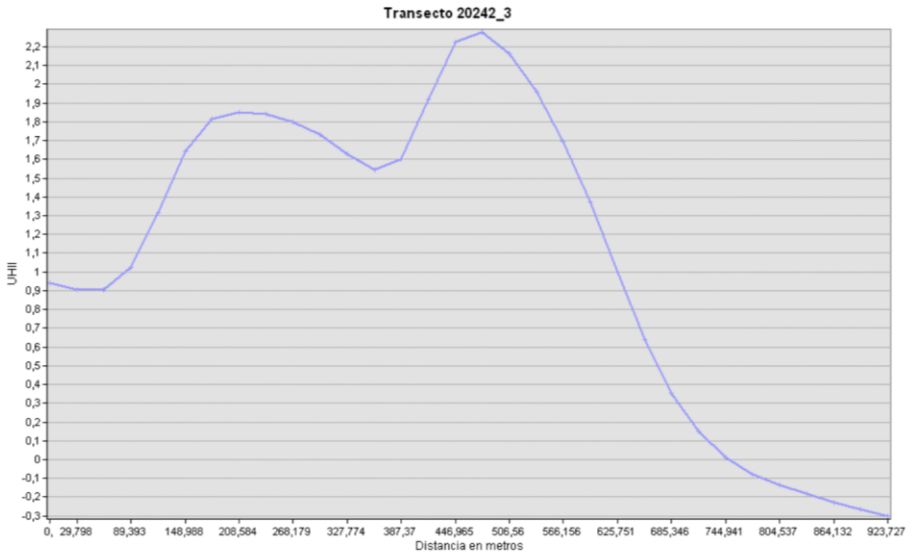
Fig. 31. *Histograma para el transecto desde tejido urbano continuo en la comuna Palogrande y un área de conectividad ecológica.*



El histograma que se muestra continuación (**Fig. 32**) muestra la tendencia de índices de isla de calor para un transecto de 920 metros aproximadamente como se muestra en la ***figura 26,*** evaluado entre lo que corresponde al área de interés ambiental Cerro Sancancio y varias áreas de tejido urbana continua dentro de la comuna Universitaria, los índices de islas de calor urbana UHII para este transecto alcanzan los valores extremos máximos registrados en los 2 años evaluados y comparados con los otros transectos del año 2024, debido a que alcanzan valores máximos de hasta 2.2 de UHII que serían elevados a comparación de los máximos del 2019 para otros lugares y se encuentra el valor más bajo registrado para todas las evaluaciones puntuales realizadas, siendo de -0.3 de UHII. La curva de inflexión que se observa entre 327 y 367 metros,

podría corresponder a un área arborizada urbana, o algún parque público con buena arborización, viéndose disminuidos los valores de UHII en dicho tramo específico.

Fig. 32. *Histograma para el transecto desde tejido urbano continuo en la comuna Universitaria y el área de interés ambiental "Cerro Sancancio".*



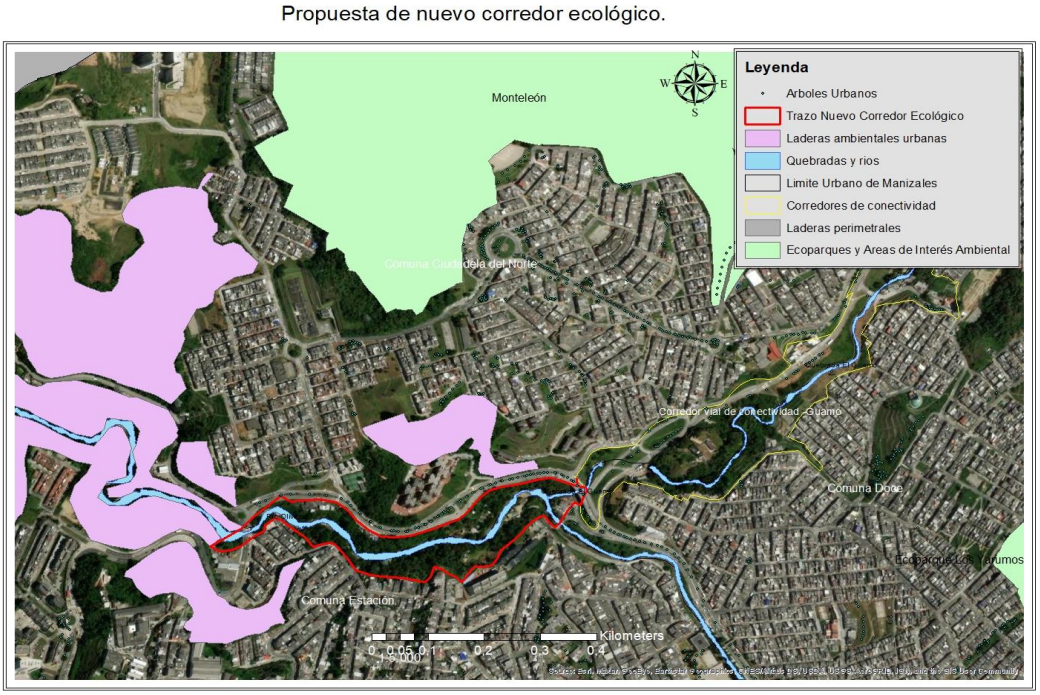
Estos perfiles de índices de islas de calor ayudaron a comprender mejor los factores de la cobertura de suelo que contribuyen al desarrollo de esta problemática ambiental. después de comprender qué unas comunas son más calurosas que otras y cómo se comparan con las temperaturas de toda la ciudad, se concluye que en el área de estudio hay comunidades

potencialmente afectadas por estos episodios de calor extremo y las características que hacen que algunas áreas sean más susceptibles que otras a tener existencia de islas de calor urbanas.

7.6 Nuevo corredor ecológico para la ciudad de Manizales (FASE 3)

Según los postulados conceptuales y técnicos evaluados, el lugar que podría ser el nuevo corredor ecológico para fortalecer la conectividad de paisaje en la ciudad, involucra algunos los relictos de los bosques riparios y otros lugares con potencial ecológico de la quebrada Olivares, que a su vez pertenece a la cuenca del río Guacaica, los cuales que se podrían restaurar, conservar y reforestar.

Fig. 33. *Propuesta de nuevo corredor ecológico para la ciudad de Manizales. Elaboración propia.*



Desde el ***criterio espacial*** el nuevo corredor ecológico busca fortalecer la conectividad entre un corredor de conectividad preexistente de la quebrada El Guamo al Norte en la comuna Ciudadela del Noreste y algunas laderas ambientales urbanas en la Comuna La Estación (al Occidente), dicha quebrada el Guamo a su vez tiene conectividad entre el Área de interés ambiental de "Monteleón" y las laderas ambientales tienen también conectividad con el corredor de conectividad preexistente de la quebrada Olivares.

Desde el ***Criterio Social*** La Secretaría de Planeación y la Universidad de Manizales presentaron el estudio demográfico del municipio evidenciando que las comunas con mayor peso porcentual de personas entre jóvenes con corte a 2018, son Ciudadela del Norte (20,12 %), Nuevo Horizonte o comuna doce (19,74 %), La Macarena (18,56 %) y La Fuente (17,36 %) Centro de información Alcaldía de Manizales, 2021. si se entiende que las Islas de Calor Urbana (UHI) son problemáticas ambientales que afectan la calidad de vida de la población por afectaciones de diferentes índole a la salud y al bienestar de los jóvenes y de la población en general, entonces el nuevo corredor ecológico podría impactar positivamente a una buena proporción de ciudadanos debido que se posicionaría en comunas altamente pobladas que tuvieron resultados desfavorables en el análisis de zonas críticas de esta investigación como la Ciudadela del norte, Comuna Doce y Comuna la Estación, esta última comuna mencionada,

según este mismo estudio, se ubicó como una de las 3 comunas más afectadas por zonas críticas de altas temperaturas y con altos índices de islas de calor urbano UHII en 2019.

Como antecedente interesante sobre los beneficios sociales que podría tener posicionar un nuevo corredor ecológico en la Quebrada Olivares en su trabajo "Restauración de ríos urbanos en Colombia – visión de conjunto para disminuir el riesgo hidráulico y la contaminación" en 2011 el profesor Fredy Leonardo Franco Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Especialista en Sistemas y Computación de la Universidad de Manizales sostiene que un lado de la quebrada Olivares podría convertirse en un corredor biológico que una al Ecoparque Los Yarumos a través de la quebrada Vizcaya, con la Olivares. Sería un pasaje ideal para recreación, un parque lineal o ciclovía que se una en La Asunción con unos parques que puedan quedar en la zona de inundación. Periódico la Patria (2019).

Criterio de conservación: El nuevo corredor de conectividad tiene como objeto de conservación de especies de flora propios de ecosistemas riparios andinos, siendo este un corredor de agua natural, también alberga especies de fauna en general y de aves que llegan desde otros lugares a buscar alimento y refugio en los árboles.

De acuerdo a lo establecido en la resolución 077 de 2011 de CorpoCaldas; el propósito de la demarcación de las fajas forestales protectoras de cauces de ríos son: disminuir la vulnerabilidad a las inundaciones, disminuir la vulnerabilidad a las avenidas torrenciales, Mitigar la erosión superficial en las orillas, facilitar los procesos de infiltración como de

percolación en zonas de recarga de acuíferos, actuar como filtro para reducir la contaminación, respetar el papel ecológico que desempeñan las zonas riparias con su biota asociada, regular la afluencia de agua de escorrentía a los cauces, propiciar la creación de microclimas frescos y húmedos alrededor de las fuentes de agua en meses cálidos, incrementar el valor recreativo de las riberas, propiciar el equilibrio del recurso hidrobiológico POMCA río Chinchiná (2011).

8. Conclusiones

- Con el inventario de la estructura ambiental de Manizales, se logró entender que aproximadamente una cuarta parte del territorio municipio tiene un soporte ecológico lo que en teoría es bueno, pero muchas de estas áreas de la estructura ecológica de soporte no se encuentran bien distribuidas dentro de la ciudad, sino en sus periferias, lo que hace necesario el fortalecimiento de la Infraestructura ambiental de la ciudad, pues esta también podría generar un impacto socio-económico directo en la generación de empleo para las labores de mantenimiento, administración y promoción del ecoturismo en Manizales.
- Se demostró la relación inversa entre LST y NDVI asociada a una fuerte aparición de UHI en la zona occidental de la ciudad, las menores temperaturas se hallaron en áreas con alto NDVI. La cobertura del suelo tiene relación directa con LST, lo cual puede ayudar a la planificación del uso del suelo. Para reducir los efectos de la UHI el gobierno local debe incrementar la cantidad de áreas arborizadas en las zonas de mayor concentración poblacional. dicho de otra manera, Este trabajo validó los conceptos sobre diferencias térmicas observables dependiendo del comportamiento térmico de los materiales con que está cubierto el suelo, rectificando que las áreas con cobertura de árboles muestran temperaturas menores y que las áreas con cemento, techos y asfalto (tejido urbano denso), registran altas temperaturas.
- El índice de islas de Calor o UHII por sus siglas en inglés, fue una herramienta muy útil para dimensionar la intensidad de las islas de calor en los diferentes transectos para

lugares puntuales concluyendo que el índice aumentó hacia las zonas densamente urbanizadas.

9. Recomendaciones

- El planteamiento de este proyecto, investigación de antecedentes, recolección de la información geoespacial, procesamiento de imágenes satelitales, desarrollo cartográfico y análisis de resultados tuvo un tiempo de ejecución presupuestario de 6 meses, sin embargo luego se modificó gracias al cronograma cumpliéndose en un plazo total de 7 meses, quedando aproximadamente una actividad por mes; Cabe resaltar, que esta investigación tuvo el alcance solo para informar sobre la problemática ambiental expuesta y sobre posibles medidas de contingencia, pero su ejecución requiere un presupuesto aprobado por voluntades políticas, entidades gubernamentales o no gubernamental, como también un tiempo de ejecución de varios años que involucre todos los actores de la matriz de implicados.
- Se podría profundizar en esta investigación haciendo evaluaciones puntuales en áreas críticas, para identificar geometrías y tipo de islas de calor, como también hacer evaluaciones de UHI durante un evento climático extremo (sequía o lluvia intensa) para obtener datos valiosos sobre su impacto en este fenómeno ambiental.
- Valdría la pena hacer una investigación con otros métodos de islas de calor urbana en Manizales al final y al comienzo de la temporada de lluvia para observar cómo la llegada de las precipitaciones afecta la atenuación de las temperaturas superficiales y como con la atenuación de las lluvias se puede capturar la disminución máxima de las temperaturas debido a mayor humedad y cobertura vegetal.

- Esta investigación puede ser de utilidad y servir como antecedente para planeadores urbanos, científicos, ingenieros y trabajadores sociales para mejorar la calidad del medio ambiente urbano en el diseño de espacios más verdes, cambiando usos del suelo y desarrollando lineamientos en el diseño de espacios urbanos más sostenibles.
- La disponibilidad de imágenes de los satélites LANDSAT 8 & 9, para las temporadas de lluvias en Colombia, cuentan con un alto porcentaje de nubosidad para la zona urbana del municipio de Manizales, lo que impide que haya lecturas consistentes sobre la temperatura superficial del suelo LST, por lo tanto, no se puede obtener una zonificación real de las Islas de Calor Urbana para las temporadas de lluvia Marzo- mayo y septiembre y noviembre.
- La disponibilidad de información en las estaciones de monitoreo ambientales del SIMAC de la ciudad es limitada, debido que los registros a los que los ciudadanos tienen disposición no están en tiempo real y algunas de las estaciones presentan presuntas fallas por lo que algunas se encuentran en mantenimiento o con faltantes de información.

10. Referencias

1. Aragón, J. A., Rodríguez, E. D., Varón, G. A., & Sánchez, G. A. (2020). Análisis de islas de calor por medio de imágenes satelitales y sistemas de información geográficos en el área urbana de la Sabana de Bogotá. Geographicalia, (72), 39-64.
2. Ansermot Pulgarín, D. A. (2022). Mortalidad por cáncer de piel no melanoma en el departamento de Caldas, Colombia, 2010-2019.
3. Bennett, A. F. (2003). *Linkages in the landscape: the role of corridors and connectivity in wildlife conservation*. IUCN Forest Conservation programme. IUCN (Ed.) Gland, Switzerland and Cambridge, UK. Xiv + 254 Pp.
4. Bosque-Sendra, Joaquín & García, Rosa. (2000). El uso de los sistemas de Información Geográfica en la planificación territorial. Anales de geografía de la Universidad Complutense, ISSN 0211-9803, Nº 20, 2000, pags. 49-67. 20.
5. Briffett, Clive & Sodhi, Navjot & Yuen, Belinda & Kong, Lily. (2004). Green corridors and the quality of urban life in Singapore.
6. Carcavilla, Luis & Belmonte Ribas, Ánchel & Durán Valsero, Juan & Hilario, Asier. (2011). Geoturismo: concepto y perspectivas en España. 19.
7. Campbell, S. (2021). Planning: green cities, growing cities, just cities? Urban planning and the contradictions of sustainable development. In The Earthscan Reader in Sustainable Cities (pp. 251-273). Routledge.
8. Chuvieco, E. (1991). Fundamentos de teledetección espacial. Estudios Geográficos, 52(203), 371.

9. Duque Escobar, G. (2016). Clima andino y problemática ambiental. Departamento de Matemáticas y Estadística.
10. Duque S. Martha C., Álzate M. Jhon J., Otálvaro T. Carlos A. (2000). Problema Socioambiental en la Expansión Urbana de Manizales, Universidad de Manizales, Facultad de Economía.
11. Ersoy, E. (2016). Landscape Ecology practices in planning: landscape connectivity and urban networks. Sustainable urbanization, 291-316.
12. Faizan, M. (2020, December). Assessment of Urban Heat Island using GIS and Remote Sensing-A Case Study of Chennai City, India. In Conference: Global to Local Sustainability & Future Earth at Udaipur, India.
13. Grupo, H. C. (2008). Estructura Ecológica Principal del Departamento de Caldas como determinante ambiental del ordenamiento territorial.
14. Gastezzi-Arias, P., Alvarado-García, V., & Pérez-Gómez, G. (2017). La importancia de los ríos como corredores interurbanos. Biocenosis, 31(1-2).
15. Jiménez Caldera, J. E. y Durango Severiche, G. Y. (2021). Diagnóstico y planificación del espacio público urbano. Análisis espacial soportado en la participación ciudadana. Bitácora Urbano Territorial, 31(2), 257–283. https://doi.org/10.15446/bitacora.v31n2.86738
16. Kogut, Petro (2022) Análisis Espacial De Datos: Tipos, Prácticas Y Usos. Eos Data Analytics. https://eos.com/es/blog/analisis-espacial

17. Le Cœur, D., Baudry, J., Burel, F., & Thenail, C. (2002). Why and how we should study field boundary biodiversity in an agrarian landscape context. Agriculture, ecosystems & environment, 89(1-2), 23-40. Matsuoka, R. H., & Kaplan, R. (2008). People needs in the urban landscape: analysis of landscape and urban planning contributions. Landscape and urban planning, 84(1), 7-19.
18. MacIntyre, N.E. 1995. Effects of forest patch size on avian diversity. Landscape Ecology 10:85-99.
19. Moradipour, F., Moghimi, E., Beglou, M.J. et al. Assessment of Urban Geomorphological Heritage for Urban Geotourism Development in Khorramabad City, Iran. Geoheritage 12, 40 (2020). https://doi.org/10.1007/s12371-020-00466-3
20. Morera, C., Pintó, J., & Romero, M. (2008). Procesos de Fragmentación y Corredores Biológicos: una introducción. Journal of Latin American Geography 7(2), 164-166.
21. Naciones Unidas (2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G. 2681-P/Rev.

https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

22. Orozco Arquez, L. A. (2020). Análisis del fenómeno de islas de calor con sensores remotos y estaciones climáticas en Bogotá, Colombia.
23. Oke, T. R. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. Atmosphere, 14(4), 268-277.

24. Polo, M. (2014). Los servicios ecosistémicos de los ríos urbanos y su contribución al cambio climático. Revista de investigación ambiental Ciencia y Política Pública, 6 (1): 46/51. México.
25. Quintero López, N. (2021). Las determinantes ambientales en la ordenación del espacio urbano. Análisis normativo y morfológico de la ciudad de Manizales (Colombia).
26. Quiñones, U. M. (2022). Islas de calor urbanas: un fenómeno poco estudiado en México. Desde El Herbario CICY, 14, 178–186, 2022.
27. Quintero, C. A. M., Rendón, S. D., & Sánchez, A. D. (2023). Derecho humano al agua y ODS 6 Agua limpia y saneamiento básico. Estudio de caso Departamento de Caldas, Colombia. Criterio Libre, 21(38), 1.
28. Remolina Angarita Fernando. (2006). Analysis of the Ecological Corridors Classifications for Bogotá's Main Ecological Structure. Revista Pérez Arbelazia No 16, 29-44
29. Rocha, M.E., & Ramos, R.A. (2012). Network of urban parks and green corridors in the city of Braga, Portugal.
30. Romero D.S., Morales M.C.C. y Némiga X.A. 2011. Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México. Revista de Climatología 11(2011): 1-10.
31. Roncancio Rubio, D. N. (2013). Study Of Heat Island Phenomenon In Andean Colombian Tropical City, Case Of Studio: Manizales-Caldas Colombia (Doctoral dissertation). Sánchez Susana (2023) Corredor ecológico, ¿por qué es importante para la biodiversidad? Cuerva

https://cuervaenergia.com/es/comunidad/sostenibilidad/corredor-ecologico-importancia-para-biodiversidad/

32. Schrodt, Franziska & Bailey, Joseph & Kissling, W. & Rijsdijk, Kenneth & Seijmonsbergen, Arie & Van Ree, C. & Hjort, Jan & Lawley, Russell & Williams, Christopher & Anderson, Mark & Beier, Paul & Van Beukering, P.J.H. & Boyd, Doreen & Brilha, José & Carcavilla, Luis & Dahlin, Kyla & Gill, Joel & Gordon, John & Gray, Murray & Field, Richard. (2019). To advance sustainable stewardship, we must document not only biodiversity but geodiversity. Proceedings of the National Academy of Sciences. 116. 16155-16158. 10.1073/pnas.1911799116.

33. Secretaria de Planeación Municipal de Manizales (2015) Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Manizales 2015-2027. Manizales

34. Sepúlveda, O. (2006). Problemas ambientales de Santiago: Islas de calor y edificios de vidrio. Boletín de Geografía(24-25), 45-55.

35. Shandas, V., Voelkel, J., Williams, J., & Hoffman, J. (2019). Integrating satellite and ground measurements for predicting locations of extreme urban heat. Climate, 7(1), 5.

36. Sobrino, J. A., Sòria, G., Oltra Carrió, R., Jiménez-Muñoz, J. C., Cuenca, J., Hidalgo, V., ... & Gimeno13, L. (2009). DESIREX 2008: estudio de la isla de calor en la ciudad de Madrid. Revista de teledetección, 31, 80-92.

37. "Universidad Nacional de Colombia, CORPOCALDAS. (2015). CDIAC - Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas. Recuperado de cdiac.manizales.unal.edu.co/ el 24 de septiembre de 2024."

38. Van der Ree, R., & Bennett, A. F. (2003). Home range of the squirrel glider (Petaurus norfolcensis) in a network of remnant linear habitats. Journal of Zoology, 259(4), 327-336.

39. Villanueva-Solis, J., Ranfla, A., & Quintanilla-Montoya, A. L. (2013). Isla de calor urbana: modelación dinámica y evaluación de medidas de mitigación en ciudades de clima árido extremo. Información tecnológica, 24(1), 15-24.

40. Wolch, Jennifer & Byrne, Jason & Newell, Joshua. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough'. Landscape Urban Plann. 125. 10.1016/j.landurbplan.2014.01.017.

41. Wang, J., Zhou, W., & Wang, J. (2019). Time-series analysis reveals intensified urban heat island effects but without significant urban warming. Remote Sensing, 11(19). https://doi.org/10.3390/rs11192229.

42. La Quebrada Olivares, arrinconada (2019, 24 de febrero) La Patria. https://archivo.lapatria.com/medioambiente/la-quebrada-olivares-arrinconada-432410

43. Secretaría de Planeación y Universidad de Manizales presentaron estudio demográfico del municipio que servirá para la toma de decisiones basadas en datos (2021, 27 de octubre) Centro de Información Manizales. https://centrodeinformacion.manizales.gov.co/secretaria-de-planeacion-y-universidad-de-manizales-presentaron-estudio-demografico-del-municipio-que-servira-para-la-toma-de-decisiones-basadas-en-datos/

44. Zonificación ambiental plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná (2011) CORPOCALDAS-ASOCARS-Universidad Nacional. https://corpocaldas2022.blob.core.windows.net/webadmin/file_03-FaseZon_Q22hkaEb.pdf