

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN E INTENSIDAD DE LAS ISLAS DE CALOR URBANAS SUPERFICIALES DIURNAS (ICUs) EN EL CANTÓN MANTA, MANABÍ Y SU RELACIÓN CON LA VEGETACIÓN LOCAL Y OTRAS VARIABLES GEOGRÁFICAS.

EDUARDO ANDRÉS AGUILAR GARCIA

**Trabajo Final de Máster para optar por el título de:
Máster en Planificación Territorial y Gestión Ambiental**

Tutor: Dr. Pablo Sarricolea

Centro Universitario Internacional de Barcelona

Agosto 2021

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mi mamá, por ser la mejor guía en todos los procesos de mi vida, inculcándome valores esenciales, por su fiel e incondicional apoyo, sin el cual no hubiera sido posible alcanzar esta meta. Estoy eternamente agradecido por todo lo que ha dejado por mí y no me alcanzará esta vida ni otra para retribuir todo su esfuerzo.

En segundo lugar, mi familia, por estar conmigo en momentos difíciles y de éxito, por su incondicional apoyo; y en especial a la persona que formó parte de este sueño desde el inicio y siempre me brindó su ayuda para conseguirlo pese a nuestras dificultades.

A mi tutor, el Dr. Pablo Sarricolea, por haberme guiado en este camino, por compartir sus amplios conocimientos, por su infinita paciencia, su gentileza y por haber depositado su confianza en mí.

A la Universidad de Barcelona, por haberme brindado el privilegio de acceder a una universidad de prestigio internacional y por la oportunidad de adquirir los conocimientos que hoy llevo con gratitud.

Al personal docente del departamento de Geografía e Historia de UNIBA, por la entrega a su vocación, por la calidad de sus clases, por haberme compartido sus experiencias, por los conocimientos adquiridos, la excelente disposición para atender cualquier inquietud y por convertirse en una fuente de inspiración para continuar superándome.

A mis colegas de trabajo, quienes supieron brindarme su apoyo durante este viaje, y especialmente a mi jefe inmediato, que más que jefe considero un gran amigo, por haberme depositado su total confianza, por seguir creyendo en mí día a día, y por su total apoyo en este desafío sin el cual tampoco hubiera sido posible cumplir con éxito.

A mis amigos y compañeros de UNIBA, que siempre estuvieron dispuestos a brindarme su ayuda en las situaciones de mayor necesidad.

Para todos ellos, muchas gracias.

RESUMEN

La isla de calor es una anomalía térmica que estudia la climatología urbana caracterizada por el aumento de la temperatura en las ciudades respecto a su entorno inmediato. Entre sus principales causas se destaca el desarrollo urbano incontrolado, la sustitución de coberturas de suelo naturales por aquellas que almacenan calor y el bloqueo a la ventilación, entre otras. El Cantón Manta, emplazado en la región litoral del Ecuador, ha experimentado un acelerado proceso de expansión urbana en las últimas décadas y su morfología es el resultado de la acción espontánea de diversos agentes en el territorio. Esta forma de expansión ha permitido que múltiples espacios naturales sean modificados para consolidar suelo urbano. La presente investigación realiza un análisis a la intensidad de la isla de calor superficial diurna y su relación con la vegetación (ambas con Landsat-8), así como otras variables geográficas como densidad poblacional, altitud, exposición a laderas y distancia al mar. Se analiza la variación de la temperatura para el promedio de años 2015-2021, a partir de sensores remotos y técnicas de teledetección. Se ha encontrado que la expansión urbana ha ocasionado un incremento progresivo de la temperatura superficial, generando islas de calor con una intensidad máxima de 8.88°C correspondiente al periodo 2020-2021, mientras que para el promedio de años 2015-2021 refleja una intensidad máxima de 7.11°C. Los análisis estadísticos promedio indican una baja influencia de la vegetación, pero para un año en particular (2018-2019) la situación se ajusta a la teoría. La distancia al mar se destaca como el factor con mayor influencia en la distribución de las temperaturas con una alta fuerza de correlación. Sin embargo, al observar globalmente el modelo de regresión múltiple la vegetación alcanza la mayor importancia, pues al aumentar en 0,5 el NDVI disminuye hasta en casi 5°C la temperatura de la isla de calor. Los resultados sugieren una planificación local más enfocada en políticas de conservación y ampliación de áreas verdes.

ABSTRACT

The heat island is a thermal anomaly that studies urban climatology characterized by the increase in temperature in cities with respect to their immediate surroundings. Among its main causes are uncontrolled urban development, the substitution of natural ground covers for those that store heat and the blocking of ventilation, among others. The city of Manta, located in the coastal region of Ecuador, has experienced an accelerated process of urban expansion in recent decades and its morphology is the result of the spontaneous action of various agents in the territory. This form of expansion has allowed multiple natural spaces to be modified to consolidate urban land. This research performs an analysis of the intensity of the diurnal surface heat island and its relationship with vegetation (both with Landsat-8), as well as other geographic variables such as population density, altitude, exposure to slopes and distance to the sea. The variation in temperature for the average of the years 2015-2021 is analyzed, based on remote sensors and remote sensing techniques. It has been found that urban expansion has caused a progressive increase in surface temperature, generating heat islands with a maximum intensity of 8.88 ° C corresponding to the period 2020-2021, while for the average of years 2015-2021 it reflects a maximum intensity of 7.11 ° C. Average statistical analyzes indicate a low influence of vegetation, but for a particular year (2018-2019) the situation fits the theory. The distance to the sea stands out as the factor with the greatest influence on the distribution of temperatures with a high correlation force. However, when observing the multiple regression model globally, the vegetation reaches the greatest importance, since when the NDVI increases by 0.5, the temperature of the heat island decreases by almost 5 ° C. The results suggest a local planning more focused on conservation policies and expansion of green areas.

TABLA DE CONTENIDOS

| | | |
|---------------|--|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 12 |
| 2. | JUSTIFICACIÓN | 14 |
| 3. | OBJETIVOS | 17 |
| a. | Objetivo General | 17 |
| b. | Objetivos Específicos | 17 |
| 4. | PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN | 18 |
| 5. | ÁREA DE ESTUDIO | 18 |
| 6. | MARCO TEÓRICO | 24 |
| 6.1. | Climatología urbana | 24 |
| 6.2. | Clima | 27 |
| 6.3. | Clima urbano | 29 |
| 6.4. | Islas de Calor Urbanas | 32 |
| 6.4.1. | Tipos de islas de calor | 38 |
| 6.4.2. | Isla de calor superficial (ICUs) | 39 |
| 6.4.3. | Impactos de la isla de calor | 41 |
| 6.5. | La Teledetección en la climatología | 42 |
| 6.6. | Efectos de la vegetación sobre el calor superficial | 45 |
| 7. | PLANTEAMIENTO METODOLOGICO | 47 |
| 7.1. | Identificación del área urbana del Cantón | 47 |
| 7.2. | Identificación de áreas rurales del Cantón. | 47 |
| 7.3. | Preparación de los códigos para extracción de imágenes satelitales. | 48 |
| 7.4. | Control de variables atmosféricas – nubosidad | 48 |
| 7.5. | Selección de puntos No Urbanos | 48 |
| 7.6. | Cálculo de “<i>Land Surface Temperature</i>” (LST) | 49 |
| 7.7. | Cartografía de las islas de calor | 52 |
| 7.8. | Reclasificación | 52 |

| | |
|---|----|
| 7.9. Variables geográficas | 53 |
| 7.9.1. Índice de diferencia de vegetación normalizada (NDVI) | 53 |
| 7.9.2. Exposición a laderas | 55 |
| 7.9.3. Distancia al mar | 55 |
| 7.9.4. Altitud | 55 |
| 7.9.5. Densidad poblacional | 55 |
| 7.10. Coeficiente de Correlación de <i>Pearson</i> y Modelo de Regresión lineal múltiple | 56 |
| 8. RESULTADOS | 58 |
| 8.1. Selección de los puntos de muestreo | 58 |
| 8.2. Diferencias térmicas urbanas y no urbanas | 58 |
| 8.3. Distribución de las variables geográficas de la isla de calor de superficie | 65 |
| 8.4. Coeficiente de correlación y regresión lineal | 75 |
| 9. DISCUSIÓN | 83 |
| 10. CONCLUSIONES | 92 |
| 11. BIBLIOGRAFIA | 95 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Áreas climáticas urbanas. | 31 |
| Tabla 2. Entornos topográficos comunes de ciudades y efectos meso y micro climáticos asociados..... | 36 |
| Tabla 3. Variaciones de temperatura (°C) en espacios abiertos de acuerdo con el agrupamiento de arborización. | 46 |
| Tabla 4. Clasificación de intensidades de islas de calor urbana | 52 |
| Tabla 5. Criterios para lo zonificación de la cobertura vegetal mediante los valores NDVI | 55 |
| Tabla 6. Escala de interpretación del coeficiente de correlación de Pearson | 57 |
| Tabla 7. Valores para criterios físicos del punto no urbano | 58 |
| Tabla 8. Resultados coeficientes de correlación de Pearson de las variables geográficas. | 75 |
| Tabla 9. Análisis de regresión lineal múltiple entra la isla de calor urbana y las variables geográficas entre los periodos estudiados | 76 |
| Tabla 10. Coeficientes y constantes de la regresión lineal múltiple para los periodos evaluados | 79 |
| Tabla 11. Sensibilidad de la intensidad de la isla de calor de superficie ante los cambios de valor en las variables geográficas | 82 |

LISTA DE GRAFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1. Población urbana y rural 2010..... | 19 |
| Gráfico 2. Temperatura mensual | 21 |
| Gráfico 3. Nubosidad mensual | 22 |
| Gráfico 4. Intensidades de las islas de calor urbanas de superficie | 59 |
| Gráfico 5. Resultados del cálculo del NDVI para los periodos evaluados | 66 |
| Gráfico 6. Curva de regresión ajustada para el conjunto de variables geográficas durante el promedio de años 2015-2021 (a) altitud; (b) densidad poblacional; (c) exposición de laderas; (d) distancia al mar; (e) NDVI | 78 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Representación esquemática de la atmósfera urbana que ilustra una clasificación de dos capas de la modificación urbana. | 26 |
| Figura 2. Mapas de isotermas de ICU y su correspondencia con la forma y grado de desarrollo urbano de las ciudades de Ogaki-Japón (a); Uppsala-Suecia (b); Winnipeg-Canadá (c); y Ciudad de México-México (d)..... | 33 |
| Figura 3. Ilustración de las diferencias de temperatura que forman los cuatro tipos de islas de calor urbano. | 39 |
| Figura 4. Esquema de temperaturas superficiales. | 45 |
| Figura 5. Control de condiciones de nubosidad | 48 |
| Figura 6. Promedio de temperatura | 50 |
| Figura 7. Cálculo Land Surface Temperature (LST)..... | 51 |
| Figura 8. Extracción LST desde la plataforma de Google Earth Engine | 51 |
| Figura 9. Cálculo “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI). | 54 |
| Figura 10. Extracción de datos NDVI | 54 |
| Figura 11. Herramienta de análisis espacial “zonal statistics as table” | 56 |
| Figura 12. Función de coeficiente de correlación para análisis de datos Excel | 57 |
| Figura 13. Flujo de trabajo con regresión múltiple | 57 |
| Figura 14. Intensidad máxima de la isla de calor urbana superficial del Cantón Manta periodo 2015-2016..... | 60 |
| Figura 15. Intensidad máxima de la isla de calor urbana superficial del Cantón Manta periodo 2016-2017..... | 61 |
| Figura 16. Intensidad máxima de la isla de calor urbana superficial del Cantón Manta periodo 2018-2019..... | 62 |
| Figura 17. Intensidad máxima de la isla de calor urbana superficial del Cantón Manta periodo 2019-2020..... | 63 |
| Figura 18. Intensidad máxima de la Isla de calor urbana superficial del Cantón Manta periodo 2020-2021..... | 64 |
| Figura 19. Intensidad máxima de la isla de calor urbana superficial del Cantón manta promedio 2015-2021..... | 65 |
| Figura 20. Índice normalizado de vegetación diferenciada del Cantón Manta periodo 2015-2016 | 67 |

| | |
|--|----|
| Figura 21. Índice normalizado de vegetación diferenciada del Cantón Manta periodo 2016-2017..... | 68 |
| Figura 22. Índice normalizado de vegetación diferenciada del Cantón Manta periodo 2018-2019..... | 69 |
| Figura 23. Índice normalizado de vegetación diferenciada del Cantón Manta periodo 2019-2020..... | 70 |
| Figura 24. Índice normalizado de vegetación diferenciada del Cantón Manta periodo 2019-2020..... | 71 |
| Figura 25. Índice normalizado de vegetación diferenciada del Cantón Manta promedio 2015-2021..... | 72 |
| Figura 26. Distribución de variables geográficas explicativas – exposición a laderas . | 73 |
| Figura 27. Distribución de variables geográficas explicativas – distancia al mar..... | 73 |
| Figura 28. Distribución de variables geográficas explicativas – altitud..... | 74 |
| Figura 29. Distribución de variables geográficas explicativas – densidad poblacional. | 75 |

INDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Temperatura mensual del Cantón Manta..... | 21 |
| Cuadro 2. Heliofanía | 22 |

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, la interacción de la sociedad con la naturaleza ha generado cambios en el territorio con efectos negativos sobre las condiciones atmosféricas y ha definido la climatología de las ciudades (Martínez, 2021; Ferrelli *et al.*, 2015). El hombre, en su búsqueda por la satisfacción de sus necesidades individuales y colectivas, ha desembocado fenómenos a varias escalas espaciales, entre los que destaca el crecimiento urbano (Sierra, 2019).

De acuerdo con Vilela & Moschella (2017) y Landsberg (1981), la expansión urbana ha modificado el paisaje creando nuevos espacios completamente antropizados. En el siglo XX se ha producido una rápida urbanización a escala mundial y la mayoría de la población mundial vive en ciudades. Este fenómeno ha producido alteraciones simultáneas en el entorno climático urbano y ocasiona un desgaste sobre los recursos naturales (Sierra, 2019).

Aunque los procesos de urbanización han apremiado a las ciudades por su mayor desarrollo económico y social, Lattes (1995) sostiene que este fenómeno ha complejizado el espacio urbano y en lugar de garantizar un desarrollo equilibrado con el entorno, ha originado un crecimiento desorganizado, sin ningún tipo de planificación con potencial para generar cambios en los patrones que regulan el clima local.

Parte de estos cambios son producto del reemplazo de las coberturas naturales del suelo por nuevas coberturas artificiales o infraestructura urbana, lo que, entre otros fenómenos, deriva en un aumento de la temperatura superficial de las ciudades (Arboit, 2018). Esta alteración climática ha dado paso a una anomalía micro climática conocida como “islas de calor urbanas superficiales”.

Este fenómeno se destaca por una concentración atípica de calor y un contraste en los patrones isotérmicos de las zonas urbanas de las ciudades con respecto a sus entornos periurbanos, modulando las temperaturas del aire en las capas más bajas de la atmósfera

(EPA, 2008); a su vez, se caracteriza por desarrollarse en los sectores más poblados y densamente edificados (Moreno & Serra, 2016).

Domínguez (2002), sostiene que este fenómeno se debe a factores asociados con la producción de calor por combustión, la conductividad de materiales constructivos, la altura de los edificios que impide la circulación de viento y la reflexión devuelta a la superficie terrestre por impurezas atmosféricas. A su vez, Flores *et al.* (2018) agrega que no sólo se modifica el clima, sino que además genera impactos sobre la salud pública. En este sentido, Córdova (2012), Lindén *et al.* (2016) y Martini *et al.* (2017), citados por Flores *et al.* (2018) afirman que el estrés térmico generado por el creciente aumento de las temperaturas influye negativamente en el bienestar de la población, incrementando la morbilidad y comprometiendo la salud de las personas por el calor excesivo.

En el contexto global, son muchos los países que han intentado abordar la problemática asociada a las islas de calor urbanas para comprender su comportamiento y generar medidas de mitigación o adaptación. En ciudades como Atenas se detectó que en el 85% de las islas de calor urbanas se producen altas presiones atmosféricas (Moreno & Serra, 2016); por otro lado, estudios como en Singapur han identificado un aumento de la temperatura del ambiente de 4 °C, registrando mayor variación durante la noche y madrugada. Mientras que en latitudes como en Turquía, ciudades como Estambul y Ankara, se ha determinado que los efectos de las islas de calor urbanas se manifiestan con más intensidad durante las 21H00 (Guillén & Orellana, 2017).

Durante los últimos años diversas investigaciones se han enfocado en el efecto de los espacios verdes sobre variables de micro cambio climático. En este ámbito, la vegetación urbana ha sido considerada como una alternativa bastante efectiva para el control de los parámetros que regulan la calidad de los entornos, tales como la contaminación del aire y la temperatura (Pava, 2020). La temperatura de la superficie terrestre posee comportamientos diferentes en zonas con abundante flora, por lo que, actualmente, la incorporación del componente biótico en el sistema urbano se perfila como un requisito para una buena planificación del territorio, principalmente porque alivian los impactos de la urbanización (Castro, 2005).

En el Ecuador se han realizado algunos estudios sobre las islas de calor, sobre todo en las zonas cálidas. De acuerdo a Guillén & Orellana (2017), ciudades como Guayaquil, Esmeraldas y Manta han sido afectadas por el cambio climático, ya que han manifestado un aumento en cuanto a las precipitaciones anuales y su temperatura, debido a la densificación, al bloqueo de la brisa por las altas edificaciones y, especialmente, por la ausencia de vegetación.

El cantón Manta, ubicado en el sur oeste de la provincia de Manabí, en las últimas décadas ha experimentado un acelerado proceso de expansión urbana y su morfología ha sido el resultado, en parte, de la acción espontánea de diversos agentes que han ido ocupando el territorio (Zambrano, 2019). Esta forma de expansión ha permitido que múltiples espacios naturales con vegetación nativa sean modificados para consolidar suelo urbano y abrir paso a nuevas implantaciones, principalmente para espacios parcelados que, hasta la presente fecha, continúan proyectándose hacia las periferias del Cantón, generando posibles variaciones en la temperatura superficial.

En este sentido, resulta importante conocer la caracterización de la isla de calor urbana superficial diurna en el Cantón y el alcance de la influencia de la vegetación y otras variables geográficas sobre su intensidad y distribución. Para este efecto, las imágenes satelitales y los sensores remotos juegan un papel preponderante ya que brindan gran cantidad de datos sobre la dinámica ambiental.

2. JUSTIFICACIÓN

En las últimas décadas, a raíz de las olas de calor que azotaron las ciudades norteamericanas y europeas más importantes, el análisis de las islas de calor ha tomado un interés mayor debido fundamentalmente a que el impacto de las olas de calor se ve magnificado por la isla térmica en las zonas urbanas (United Nations / Habitat (UN), 2011) citado por Córdova (2012).

Las crecientes preocupaciones por los cambios en el sistema climático y sus posibles interacciones con otros fenómenos más comunes sobre los territorios, han motivado a

diferentes países a formar compromisos para incorporar el componente climático a su planificación, (Acuerdo de París, 2015), y así desarrollar planes y/o políticas que permitan combatir los efectos derivados del cambio de temperatura (Guillén & Orellana, 2017).

En la actualidad, diferentes organizaciones e instituciones están orientado sus esfuerzos para explorar alternativas que permitan mitigar el efecto del incremento del calor (Oke *et al.*, 2017). Los árboles, arbustos y plantas más pequeñas como enredaderas, pastos y cobertura del suelo, constituyen mecanismos naturales que ayudan enfriar el entorno. Sin embargo, uno de los efectos menos disruptivos del desarrollo urbano ha sido la eliminación de la cobertura vegetal, por lo que en muchas comunidades se han perdido árboles y espacio a medida que han crecido (EPA, 2008).

Castro (2005), sostiene que el efecto del calor es más notorio sobre los centros urbanos de localidades desprovistas de vegetación, por lo cual una de las principales alternativas desde el contexto ecológico es la priorización de espacios verdes, por los beneficios ambientales en las áreas urbanas como el mejoramiento del microclima, el control sobre los niveles de radiación solar, la regulación de la humedad y la temperatura del aire y el movimiento del viento.

Soto-Estrada (2019) indica que los efectos de las ICU pueden ser mayores en los países en vías de desarrollo. La expansión acelerada de las ciudades en estos países incrementa el número de habitantes en condiciones de vulnerabilidad ante ICU y olas de calor. En el grupo de personas vulnerables se incluyen los habitantes de viviendas construidas con materiales que no proporcionan aislamiento térmico y aquellos con acceso limitado (Campbell-Lendrum & Corvalán, 2007).

A más de los efectos sobre el desarrollo urbano, otro de los impactos significativos asociados a las islas de calor corresponde al aumento en la demanda y el consumo de agua y energía (Guhathakurta & Gober, 2007) y al incremento de la morbilidad y mortalidad para las poblaciones urbanas vulnerables, especialmente las que trabajan al aire libre, debido a los periodos de calor extremo (Oke *et al.*, 2017).

Algunas estimaciones indican que los eventos extremos de calor en el planeta podrían aumentar significativamente, tanto en frecuencia, como en intensidad, en el siglo XXI (Meehl & Tebaldi, 2004) citados por Cordova (2012). Este escenario resulta preocupante ya que las condiciones de sequía, la baja humedad del aire y las altas temperaturas contribuyen al aumento del material particulado en suspensión. especialmente partículas entre 1 y 10 micras, lo que supondría un incremento considerable en los casos de enfermedades respiratorias, como asma, bronquitis y cuadros alérgicos (Perdomo, 2009). Estos eventos conllevarán a un incremento en los riesgos a la salud derivados del calor extremo y por las condiciones particulares de la climatología local los espacios urbanos serán vulnerables a la ocurrencia de estos eventos.

Actualmente, el Cantón Manta atraviesa por una alta demanda por la ocupación de suelo urbano, por lo que diversos espacios con superficies naturales están siendo reemplazados para el emplazamiento de vías y equipamiento público, y la distribución de las escasas zonas verdes en la ciudad no ha estado sujeta a procesos de ordenación del territorio. Aunque se han realizado algunas intervenciones para el incremento de los espacios verdes, se desconoce el nivel de influencia que estas intervenciones han alcanzado para mitigar impactos ambientales importantes, especialmente sobre de la temperatura superficial.

Considerando el acelerado proceso de expansión urbana que continúa presentado el Cantón Manta; a su vez, dado que las proyecciones realizadas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático y la Organización Mundial de Meteorología indican que la intensificación de las olas de calor puede estar relacionadas con los efectos del cambio climático; por otro lado, conociendo los impactos socio-económicos de la ICU como el incremento de la morbilidad y mortalidad sobre las poblaciones urbanas vulnerables, especialmente en países en vías de desarrollo; y en vista de que múltiples estimaciones en el campo científico señalan que los eventos extremos de calor en el planeta pueden aumentar significativamente tanto en su frecuencia como intensidad, resulta imperativo monitorear estos eventos, así como la intensidad y extensión de la isla de calor superficial en las áreas urbanas. En virtud de aquello, se considera necesario abordar el estudio la isla de calor urbana superficial diurna en el Cantón Manta, con el fin

de conocer su intensidad, distribución espacial, su concreción en los barrios, y cuál es la relación de la cobertura vegetal urbana y otras variables geográficas en los patrones que determinan de intensidad de la temperatura superficial.

El presente proyecto posee una utilidad tanto social como ambiental, ya que permitirá conocer la distribución de las islas calor, la influencia de la vegetación sobre la regulación de la temperatura en el casco urbano del Cantón y el tipo de vegetación que más favorece en este contexto. Es importante destacar que la información en el ámbito de la investigación local es muy escasa, por lo cual el proyecto podrá contribuir a la generación información útil para la toma de decisiones en la gobernanza local y la adopción de medidas de mitigación o adaptación ante los impactos del micro cambio climático.

3. OBJETIVOS

a. Objetivo General

Formular un análisis correlacional entre la distribución de la isla de calor superficial diurna del Cantón Manta, la vegetación urbana y otras variables geográficas.

b. Objetivos Específicos

1. Cuantificar los parámetros de intensidad, configuración y el máximo térmico de la isla de calor superficial diurna (ICUs) y su concreción en los barrios del Cantón.
2. Diferenciar la cobertura vegetal urbana del Cantón mediante técnicas de teledetección.
3. Determinar la variación de las temperaturas en la zona urbana mediante la correlación entre las zonas con intensidad de calor, las superficies desprovistas de vegetación y otras variables geográficas.
4. Identificar la tipología de formaciones vegetales locales que permiten regular en mayor medida la variación de la temperatura superficial.

4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿La cobertura vegetal de la zona urbana del cantón permite atenuar el efecto de las islas de calor urbanas superficiales?

¿Qué tipología de formaciones vegetales mitigan en mayor medida la intensidad de las islas de calor?

¿En el marco de las islas de calor, qué sectores requieren atención prioritaria enfocada en el mejoramiento de la cobertura vegetal?

5. ÁREA DE ESTUDIO

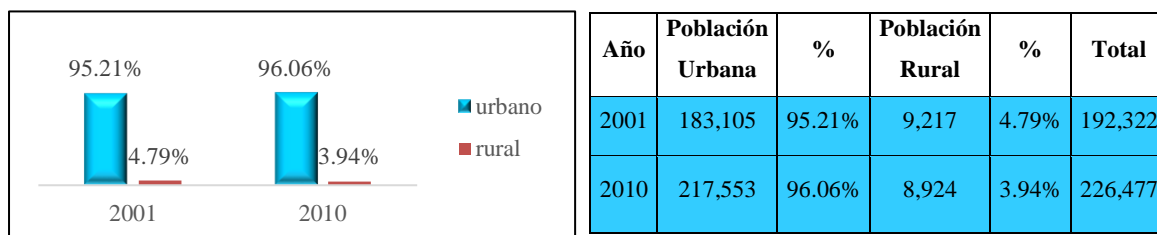
El Cantón Manta ubica en la región occidental de América del Sur sobre el Océano Pacífico. Se extiende a ambos lados de la línea equinoccial, de 0°25 minutos de latitud norte hasta 1°57 minutos de latitud sur y de 79°24 minutos de longitud oeste a los 80°55 minutos de longitud oeste. Posee una superficie total de 306 km² y dentro de sus límites geográficos se encuentra: al norte con el océano pacifico, al sur con el Cantón Montecristi, al este con los cantones Jaramijó y Montecristi y al oeste con el océano pacifico.

En cuanto a su demografía, según los datos del censo poblacional realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) en el 2010, el Cantón proyectó una población de 247,436 habitantes y una densidad demográfica de 657 hab./km². Mientras que, en el 2020 el Cantón proyectó una población de aproximadamente 264,281 habitantes (INEC, 2010). El crecimiento acelerado del Cantón ha permitido a la urbe consagrarse como un polo de desarrollo industrial, comercial, y especialmente turístico, siendo las industrias pesquera y turística las de mayor auge.

La organización político-administrativa divide al Cantón en cinco parroquias urbanas (Manta, Tarqui, Los Esteros, Eloy Alfaro y San Mateo) y dos parroquias rurales (Santa Marianita y San Lorenzo). La población urbana constituye el 96.06%, alcanzando los 217,553 habitantes, mientras que la población rural representa el 3.94% de la población

total con 8,924 habitantes aproximadamente (Gobierno Municipal de Manta, 2014) (ver Gráfico 1).

Gráfico 1. Población urbana y rural 2010



Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas y Censo, 2010.

El relieve del Cantón se caracteriza por su irregularidad, con presencia de pequeñas colinas y montañas bajas de cúspides planas. En el sector de Pacoche y San Lorenzo las montañas alcanzan alturas de 350 mm, consideradas como la mayor altitud del Cantón. La morfología del Cantón se considera irregular por la presencia de las colinas bajas y se destacan las mesetas costeras planas o “tablazos”, ubicados en dos o tres niveles altitudinales. La presencia de dos cauces naturales que atraviesan la ciudad de este a oeste, el Burro y el Manta, marcan la topografía del cantón en cortes perpendiculares de consideración. Por otro lado, las cotas extremas promedio se ubican entre 5 y 60 msnm (Gobierno Municipal de Manta, 2019)

Los tipos de suelo en el Cantón son muy variables y debido a su irregularidad son vulnerables ante eventos adversos naturales y antrópicos. Aunque en su territorio existe siete tipos de suelo, predominan tres por su mayor relevancia: el INCEPTISOL, con mayor área de cobertura (44.81%), es muy común en regiones montañosas y existe en tierras nativamente jóvenes, cuya fertilidad es muy variable; el ALFISOL constituye el 28.5% del suelo, presenta características de suelo arcilloso, por lo que no es fértil y requiere fertilizantes; y el ARDISOL que corresponde al 12.06%, con características de suelo arcilloso y se encuentra en zonas desérticas (Gobierno Municipal de Manta, 2014).

Entre las características litológicas, la mayor parte de la superficie del casco urbano Cantón se caracteriza por la intercalación de paquetes de arenas marinas, areniscas calcáreas, areniscas conchíferas, coquinas, micro-conglomerados y conglomerados

conchíferos, a más de paquetes de arcillolitas ligeramente litificadas. El resto del territorio presenta suelos con intercalaciones de 20 a 30 cm de arcillolitas, limolitas, calcarenitas y micro conglomerado con capas levemente inclinadas (Gobierno Municipal de Manta, 2019).

En cuanto a la cobertura y uso de suelo, el 70.60% de la superficie del Cantón corresponda a cobertura vegetal natural; el 15.44% posee uso antrópico; el 3.96% es de uso pecuario; el 5.27% corresponde a uso agrícola y agropecuario mixto; mientras que el 4.73% son tierras improductivas. Por otro lado, el 90.96% de la superficie del Cantón está ocupado por parcelas de tipo “no aplicable” conformada por ríos, ciudades, centros poblados, aeropuerto, complejos recreacionales, portuarios, industriales, áreas erosionadas o en procesos de erosión, tierras en descanso (barbecho), suelos descubiertos, playas, bancos de arena, canteras, cementerios, vertedero de basura, albarradas, bosques, matorral seco y sabana ecuatorial; cubriendo una extensión de 26 616,01 ha de la superficie general del Cantón; mientras que el 2.46% corresponde a parcelas pequeñas, el 2.48% constituido por parcelas medianas y 4.32% corresponde a parcelas grandes (Gobierno Municipal de Manta, 2014).

El clima del Cantón se cataloga como subdesértico tropical y debido a su ubicación en la zona costanera está influenciado por dos corrientes atmosféricas: la corriente fría de Humboldt proveniente del Sur, que propicia la disminución de temperatura en el verano, las lloviznas en la zona seca y semiárida, y permite crear microclimas como los de las zonas de Ayampe, Pacoche, Montecristi y las Piñas. La otra corriente llamada Tropical, proviene del Norte y Oeste del Pacífico y produce el fenómeno de “El Niño”, con lluvias y temperaturas altas, que aparece en forma cíclica y se caracteriza por pluviosidades altas (Gobierno Municipal de Manta, 2014).

El promedio anual de precipitación en el Cantón es de 300.2 mm, donde los meses con más lluvia corresponden a: febrero con 78,2 mm., marzo con 73,3 mm., enero con 56,7 mm.; y, abril con 38,7 mm. Por otro lado, los meses más secos corresponden a octubre con 0,90 mm., agosto con 1,00 mm.; y, septiembre con 1,69 mm. (Gobierno Municipal de Manta, 2019) (ver Cuadro 1)

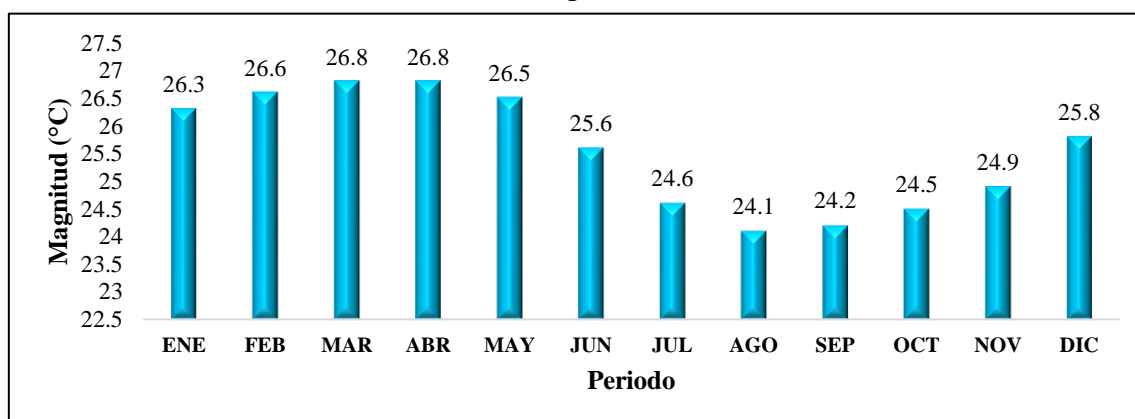
Cuadro 1. Temperatura mensual del Cantón Manta

| ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 26.3 | 26.6 | 26.8 | 26.8 | 26.5 | 25.6 | 24.6 | 24.1 | 24.2 | 24.5 | 24.9 | 25.8 |

Fuente: Gobierno Municipal de Manta, 2014.

Las temperaturas del Cantón mantienen un patrón bastante regular, con un promedio anual de 25.6 °C y una variación del rango en los periodos más cálidos (marzo-abril con 26.8°C) y el mes más frío (agosto con 24.1 °C) de 2.7 °C. A su vez, también se manifiesta una temporalidad climática estacional debido a la presencia de las corrientes oceanográficas: corriente fría del niño de julio a noviembre, corriente cálida del Niño de enero a mayo (ver Gráfico 2).

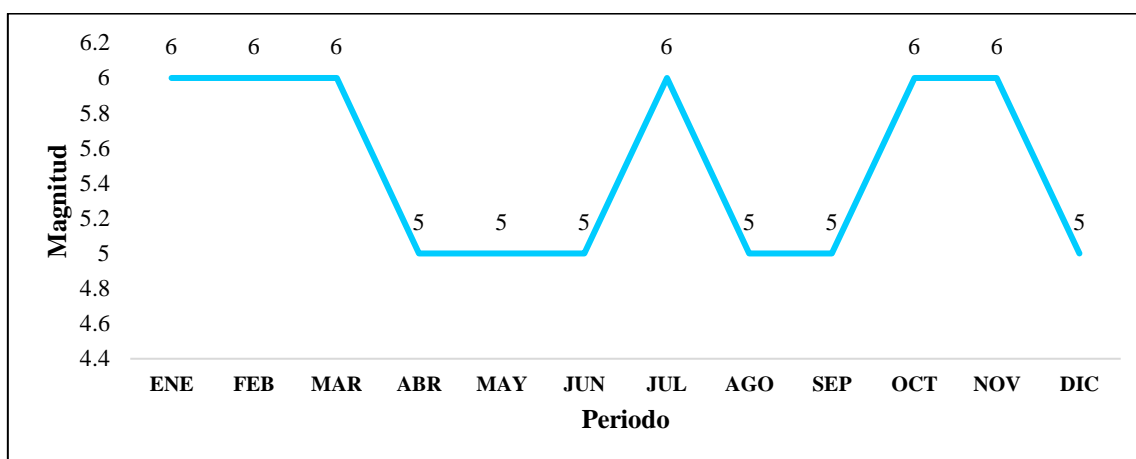
Gráfico 2. Temperatura mensual



Fuente: Gobierno Municipal de Manta, 2014.

La nubosidad promedio del Cantón es de 6 octavos, lo que determina que las 2/3 partes del cielo están cubiertas durante el año (Gráfico 3).

Gráfico 3. Nubosidad mensual



Fuente: Gobierno Municipal de Manta, 2014.

Por otro lado, los meses de mayor heliofanía corresponden a Marzo – Abril con 137,40 horas y Agosto – Septiembre con 140,15 horas (ver Cuadro 2).

Cuadro 2. Heliofanía

| | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|-----------------|------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Mínimo | 52.5 | 64.8 | 105 | 11.5 | 53.1 | 69.6 | 34.8 | 109 | 72.3 | 60.9 | 79.6 | 78.3 |
| Máximo | 88.4 | 98.4 | 134 | 140 | 121 | 11.3 | 118 | 148 | 133 | 112 | 122 | 113.6 |
| Promedio | 117 | 132.6 | 167.7 | 166 | 154.7 | 162 | 164.1 | 227.5 | 197.2 | 158.5 | 166.7 | 134.5 |

Fuente: Gobierno Municipal de Manta, 2014.

En cuanto a los potenciales ecosistémicos para servicios ambientales se destacan tres tipos:

- **Bosques deciduos de tierras bajas de la costa (entre 10 y 25 msnm):** se distribuye en la parte central de la costa; presenta características con un dosel entre 10 a 25 metros; sus suelos son arenosos o arcillosos, y se dan en terrenos planos a suavemente colinados o en pendientes inclinadas y base de montañas. El bioclima varía entre pluvi-estacional a xérico. La presencia de la estación seca que dura de 4 a 5 meses hace que el follaje del dosel caiga.
- **Bosques siempre verdes estacional de tierras bajas de la Costa (Entre 35 a 300 msnm):** este ecosistema se ubica en la parte sur occidental del Cantón y es el quinto en predominancia. Corresponde un bosque maduro y en la zona donde

colinda Manta y Montecristi (Pacocha) existe alta presencia de actividades agrarias y pastoreo de ganado. Presenta un dosel de hasta 35 m. sotobosque con predominancia de palmas. Sus suelos son ultisoles profundos, arcillosos y bien drenados, con relieves colinados y clima sub húmedo con estacionalidad ligera.

- **Matorral seco de tierras bajas de la Costa (entre 5 a 12 m de alto):** constituye el ecosistema predominante y se distribuye en todo el Cantón. Los procesos de urbanización ejercen presión antrópica sobre este ecosistema. Es posible encontrar arboles de 5 a 12 metros de alto con presencia de cactus y relieves planos de sedimentos costeros, bancos de ríos y planicies contiguas sobre colinas litorales bajas. Cuando se produce la tala en ecosistemas con caracteres boscosos es probable que se desarrollen especies arbustivas y herbáceas, como resultado de este proceso antrópico

En cuanto a las características hidrológicas, el 70% de la superficie del Cantón se considera seca, mientras que el 30% se considera tiene agua abundante, correspondiente al bosque de Pacocha. A su vez, presenta tres principales micro cuencas (rio Manta, rio San Mateo y rio Cañas) pertenecientes a la cuenta de Manta, que posee una extensión de 1,024 km², con un potencial de escurrimiento medio anual de 79,26 millones de m³ y un rendimiento específico anual de 80.000 m³/km², que lo ubica entre los más bajos de la Provincia, lo que a su vez impide mantener un caudal mínimo para el mantenimiento ecológico (Gobierno Municipal de Manta, 2014).

Los ríos que atraviesan el Cantón son de régimen occidental y debido a la presencia de la Cordillera Chongón Colonche influye presentan características marcadamente estacionales e intermitentes en cuanto al volumen de agua de transporte.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Climatología urbana

– Contexto histórico (1930 hasta 1965)

La climatología urbana es una rama de investigación de la geografía que se ocupa del estudio de la relación entre la ciudad y la atmosfera suprayacente. Se define principalmente por su enfoque en la ciudad e incorpora aspectos de muchas disciplinas diferentes, que incluyen meteorología, climatología, ciencias de la contaminación del aire, arquitectura, ingeniería de la edificación, diseño urbano, biometeorología, entre otras (Mills, 2014)

Aunque la percepción del clima urbano es muy antigua, el origen de la climatología moderna es relativamente reciente (García, 2011). Su desarrollo estuvo influenciado por el destacado aporte de algunas obras clásicas de literatura científica entre las que sobresalen: “*The climate of London*” por Luke Howard publicado en 1833; “*The climate of cities*” por Albert Kratzer publicada en 1937; y “*The climate of London*” por Tony Chandler publicada en 1956.

En el siglo XVII, el desarrollo de instrumentos meteorológicos como el termómetro, el anemómetro y el barómetro permitió analizar aspectos más sutiles del clima urbano en París y Londres. Luke Howard, a partir de su obra “*the climate of London*” reconoció el fenómeno de la isla de calor al comparar los registros de la temperatura del aire de la zona rural (T_R) con los registros mantenidos por la *Royal Society* en el centro de Londres (T_U) (Mills, 2014). La evidencia grafica de los datos mostró que el área urbana tuvo un efecto de calentamiento distinto al de la atmósfera cercana a la superficie rural. Howard concluyó que la temperatura media del clima es estrictamente alrededor de 48.50° Fahrenheit, pero en las partes más densas de la metrópoli el calor aumenta por el efecto de la población y los incendios a 50,50 ° (Howard, 1833; Oke *et al.*, 2017).

A partir de 1927 el trabajo en la red de estaciones sinópticas de las zonas urbanas se vio favorecido por la invención de la estación móvil de Wilhelm Schmidt. Sus análisis revelaron pequeñas variaciones de clima colocando instrumentos en un vehículo y

atravesando una ruta para obtener la distribución espacial de los elementos meteorológicos. Esta técnica proporcionó una visión de los detalles de los climas urbanos, sin embargo, su aplicación tenía cuestionamientos debido a la dificultad de simultaneidad de mediciones (Oke *et al.*, 2017)).

Tras la segunda guerra mundial, durante la etapa de reconstrucción, la información climática fue incorporada en la planificación de las ciudades, que fue acompañado por un rápido desarrollo de viviendas, industrialización y deterioro ambiental en países como Alemania, Japón, Rusia e Inglaterra. Durante este periodo Ake Sundborg se destacó como el primer climatólogo en predecir la magnitud de la isla de calor y, fundamentalmente, fue el primero en expresar la causa de la isla de calor dentro de una energía superficial gracias a sus trabajos de cromatografías urbanas. Mientras que, los estudios de Takahashi y Kawamura relacionaron las características físicas como la estructura y el tejido urbano con la morfología de la isla de calor (Oke *et al.*, 2017).

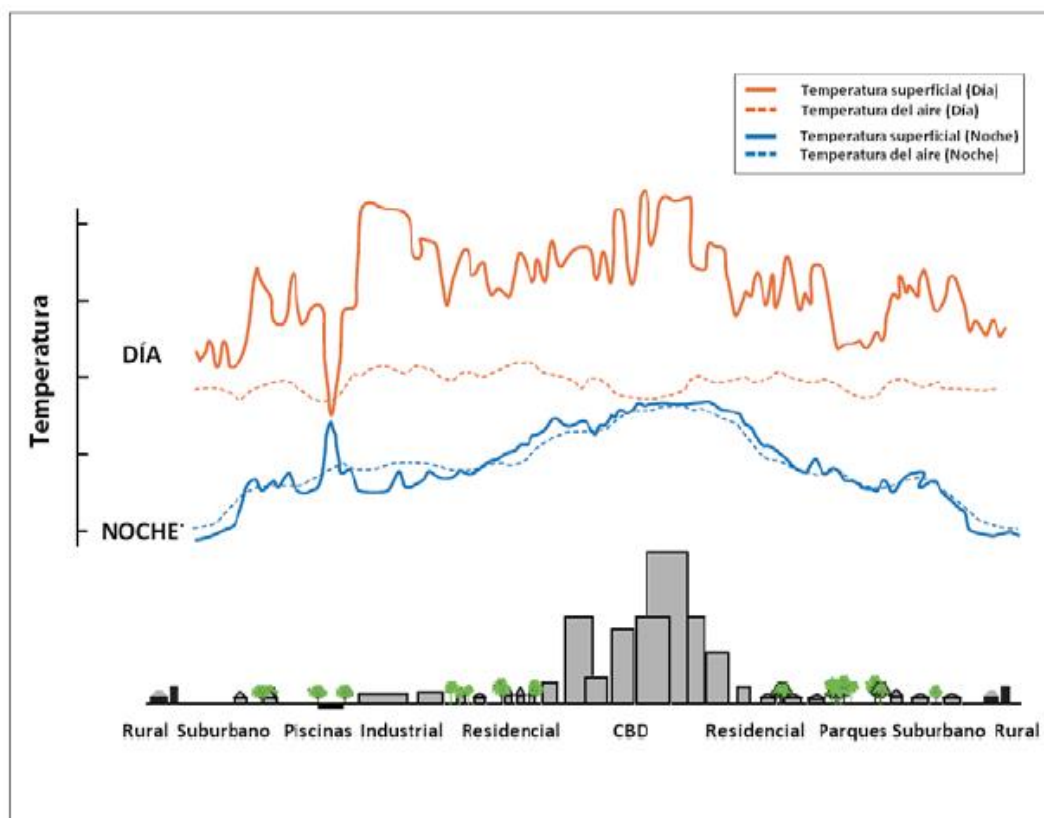
- **Climatología física de las ciudades (1965 hasta 2000)**

En 1977 William Lowry realizó contribuciones fundamentales para la conducción de la climatología urbana, con una prescripción metodológica sobre la evaluación de los efectos urbanos sobre el clima. Por otro lado, en 1964 Peter Summers introdujo la noción de la atmósfera urbana como una capa límite en desarrollo, mediante el sondeo a la estructura vertical de la temperatura y aportó nuevos conocimientos para abordar aspectos del clima urbano como los estadísticos, los meteorólogos de radar y los modeladores numéricos (Changnon *et al.*, 1977 y Ackerman *et al.*, 1978; Oke *et al.*, 2017).

Los primeros esfuerzos para modelar los procesos responsables de los efectos del clima urbano permitieron profundizar la comprensión de la isla de calor y su génesis. Estos primeros pasos incluyeron los modelos numéricos de islas de calor de Summers y Myrup; el modelo de hardware a escala de Davis y Pearson; el perfil del viento urbano de Davenport y; modelos numéricos de transferencia de radiación en la capa límite urbana contaminada (Arnfield, 2003).

Un impedimento importante durante el estudio de los efectos del clima urbano fue cómo abordar la heterogeneidad del paisaje urbano y las diferentes escalas de efectos urbanos. Los datos de observación y las simulaciones numéricas a menudo eran incompatibles ya que no existía un marco. En este sentido, Oke (1976) estableció la distinción entre la capa de dosel isla de calor urbano y la capa límite de isla de calor urbano; a su vez, definió un esquema de la capa límite urbano y la atmósfera urbana existente en las ciudades (ver figura 1).

Figura 1. Representación esquemática de la atmósfera urbana que ilustra una clasificación de dos capas de la modificación urbana.



Fuente: Oke (1987) modificado por Sarricolea & Romero (2010)

Aunque la teoría de la capa límite se había desarrollado para superficies homogéneas, no existía certeza si estos conceptos se podrían aplicar a paisajes urbanos de gran heterogeneidad. La obra de Roth (1993) y Schmid (1994) proporcionó las pautas para atender esta incógnita, ya que mostró que la turbulencia urbana es muy similar a la de un terreno extenso más homogéneo. Ese trabajo abrió el camino para recomendar pautas para

la exposición de sistemas de instrumentos en entornos urbanos (Oke, 2004; Oke *et al.*, 2017).

- **Consolidación y predicción (desde el 2000)**

A finales del siglo XX, se formó la Asociación Internacional para el Clima Urbano (IAUC) dedicada a promover el trabajo en el campo del clima urbano. Se consolida la comprensión de fenómenos y el desarrollo de potentes modelos para simular los funcionamientos y climas de atmósferas urbanas. Este proceso estuvo apoyado por los avances en la tecnología y el advenimiento de sistemas informáticos más potentes, sistemas de sensores distribuidos y crowdsourcing de datos, la disponibilidad de geo información, sistemas de teledetección y satélites que pueden detectar la superficie y la atmósfera urbana.

6.2. Clima

El surgimiento del clima como concepto requirió importantes transformaciones del conocimiento en varios campos de la investigación científica. Desde su invención en la geografía antigua ha permanecido como un concepto de nicho. Sólo más tarde, en el siglo XIX, se entendía por “clima” el tiempo medio. En sus inicios el clima era concebido como una teoría de distribución del calor y humedad en un lugar determinado en el globo (Mauelshagen, 2018).

A partir de la conferencia de Varsovia en 1935 la Organización Meteorológica Mundial como las condiciones meteorológicas medias para el mes y el año, calculadas para un período de 30 años. Por otro lado, Yezve (1993) define al clima como la síntesis del conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas en un área determinada, en un tiempo amplio para que sea geográficamente representativo.

El clima posee diferentes escalas de estudio que determinan su comportamiento de acuerdo con extensión y duración. En este ámbito, Ribeiro (1993) propone una caracterización de las escalas de estudio del clima:

-
- **Clima zonal o macro clima:** está definida por las circulaciones atmosféricas primarias como la zona de convergencia de los alisios, cinturones hemisféricos de alta presión y las oscilaciones Sur asociada con el “Niño”. Se produce por la distribución de la radiación solar a nivel latitudinal que implica la curvatura de la superficie y la inclinación de su eje en el plano de la eclíptica. Los fenómenos climáticos a escala tienen una extensión horizontal entre 1000 y 5000 km y cubren verticalmente toda la atmósfera (Ribeiro, 1993).

 - **Clima regional o meso clima:** el factor geográfico es determinante en esta escala ya que se caracteriza por la acción transformadora de la circulación general de la atmósfera generada por un conjunto de factores físicos de la superficie como la distribución entre áreas continentales y oceánicas, forma de continentes, corrientes marinas y rugosidad de continentes. Los climas regionales tienen una extensión horizontal entre 150 y 2500 kilómetros y verticalmente están limitados por los fenómenos que ocurren debajo de la Tropopausa.

 - **Clima local:** esta zona está determinada por la configuración del terreno, el tipo de suelo y su cubierta vegetal sujetos solo a pequeños cambios en el tiempo, determinando el clima predominante en un lugar dado, en el orden de cientos de kilómetros cuadrados. Se caracteriza por la acción antrópica, los cambios de uso de suelo y los gases de efecto invernadero. La extensión horizontal es muy variable, ya que la inserción individualizada o combinada de factores fisiográficos y antrópicos en el clima tiene un tamaño o predeterminado. Atkinson (1987) citado por Ribeiro (1993) indica que la mayoría de los estudiosos considerarían entre 15 y 150 kilómetros como una escala espacial apropiada.

 - **Micro clima:** se define por la magnitud de los intercambios de gas y energía entre las características o estructuras particularizadas (incluidos objetos, plantas y animales) dispuestas en la superficie de la Tierra y el aire que los rodea. Es el resultado de las condiciones generales de circulación en la superficie por alguna estructura urbana o por la formación de vegetación. La extensión horizontal de los microclimas ha sido bastante debatida. Yoshino (1975) citado por Ribeiro (1993) señala valores entre 0,1 a

1000 metros; mientras que Geiger (1967) señala que la extensión horizontal puede llegar hasta los 10 km.

Dado que las modificaciones en las ciudades pueden favorecer la aparición de un clima local al alterarse registros de algunos elementos climáticos tales como la temperatura y la humedad, resulta interesante analizar el clima a escala local. Una categoría propia de estos constituye los climas urbanos (Olcina Cantos, 1996).

6.3.Clima urbano

Los procesos antrópicos que se generan a escalas urbanas, como facetas, urbanismo, edificios, manzanas y barrios, producen fenómenos atmosféricos que modifican el clima de las ciudades (Oke *et al.*, 2017). Sin embargo, estos fenómenos atmosféricos están sujetos a modulaciones de escalas regionales, por lo que resulta distinguir el clima urbano de las influencias no urbanas.

El clima urbano se define como un clima regional modificado y su caracterización es determinada en términos de comparación con su entorno periurbano o rural. El asfalto, los edificios y el trazado de la red viaria modifican los balances de radiación entre el suelo y el aire, reducen la evaporación y disminuyen la velocidad del viento. Esto se traduce en un aire altamente contaminado y la aparición de un clima urbano característico, cuyo rasgo más destacable es el aumento de las temperaturas con relación a las áreas suburbanas (Fernández & Martilli, 2012).

Entre los avances alcanzados por el estudio del clima urbano se destaca la trascendente obra de Albert Kratzer, *Das Stadtklima*, publicada en 1935, misma que señala cómo abordar el clima de la ciudad desde tres perspectivas: el clima de la ciudad como un todo unificado, capaz de generar sinergias y dinamismos a partir de aspectos meteorológicos propios; el clima de áreas específicas de la ciudad, como zonas industriales, residenciales, centro de la ciudad y su periferia; y el clima de las calles de acuerdo a su orientación con respecto al sol y al viento.

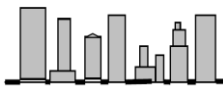





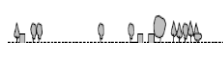
A su vez, Kratzer, citado por Sarricolea (2012), señala ciertas diferencias térmicas entre el clima urbano y su periferia enfocadas en tres ejes: la radiación solar, que se ve influenciada por la baja rugosidad la zona rural que permite devolver rápidamente la radiación solar al cielo, mientras que en las ciudades se queda atrapada entre las viviendas; el viento de las ciudades que es capaz de bloquear su flujo, mientras que las áreas rurales son accesibles a vientos suaves que refrescan el aire; y la humedad, que en zonas rurales se almacena por los suelos, mientras que las áreas urbanas carecen de humedad.

Respecto a las escalas de los climas urbanos, Oke (2004) señala que para determinar los sitios urbanos potenciales con estaciones climáticas propias es necesario distinguir las propiedades urbanas que afectan la atmosfera y entre las características básicas más importantes se encuentran las estructuras urbanas, la cubierta urbana, el tejido urbano y el metabolismo urbano.

Aunque no existe un esquema universalmente aceptado sobre la clasificación de las áreas climáticas urbanas, la propuesta de Ellefsen (1991) diferencia 17 subtipos de áreas climáticas urbanas y permite describir la estructura urbana en cuanto a rugosidad, flujo de aire, acceso y detección de radiación. Sin embargo, el esquema resulta menos útil cuando las características construidas son escasas y hay grandes áreas de vegetación, suelo desnudo y agua (Oke, 2004).

Sobre la base de esto, Oke (2004), propone un esquema más simple basado en las zonas climáticas urbanas de Ellefsen, e incorpora una medida de la estructura y también una medida de la cobertura superficial (ver Tabla 1). Si bien la precisión de este esquema no es absoluta para describir el sitio, se destaca su potencial para clasificar áreas que son similares en su capacidad para modificar el clima local e identificar las transiciones a diferentes zonas climáticas urbanas.

Tabla 1. Áreas climáticas urbanas.

| Áreas Climáticas Urbanas ¹ | Representación | Nivel de Rugosidad ² | Relación aspecto ³ | % de suelo impermeable ⁴ |
|--|---|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Intenso desarrollo urbano con edificios de gran altura de edificios y cercanos entre si ej. torres del centro |  | 8 | >2 | >90 |
| 2. intenso desarrollo de alta densidad con viviendas de alturas de 2 a 5 pisos, adosados y con edificios más altos cercanos. Abundan las construcciones de ladrillo y concreto, como en el casco antiguo de la ciudad. |  | 7 | 1.25 -2.5 | >85 |
| 3. alto desarrollo urbano con densidades medias, existencia de casas adosadas de un pie y apartamentos pequeños. |  | 7 | 0.5-1.5 | 70 |
| 4. Alto desarrollo urbano y bajas densidades. Coexisten viviendas, centros comerciales, almacenes y grandes estacionamientos pavimentados. |  | 5 | 0.05-0.2 | 75-95 |
| 5. Desarrollo urbano medio, densidad suburbana con casas de 1 o 2 pisos |  | 6 | 0.2-0.5 | 35-65 |
| 6. utilización mixta del territorio, con grandes edificios y varias áreas libres. Existen por ejemplo instituciones como el hospital, la universidad y el aeropuerto. |  | 5 | 0.1-0.5 | <40 |
| 7. desarrollo semi-rural con casas dispersas entre usos agrícolas, naturales y seminaturales. |  | 4 | >0.05 | <10 |

Fuente: Oke (2004) traducido por Sarricolea (2012)



En los últimos decenios, gran parte de los métodos de estudios están dirigidos al análisis de la isla de calor como elemento más representativo del clima urbano.

¹ Conjunto simplificado de clases que incluye aspectos del régimen de Ellsefen (1990), así como medidas físicas relativas al viento, temperatura y humedad.

² Rugosidad del terreno efectiva de acuerdo a la clasificación Davenport *et al.* (2000)

³ Relación de aspectos = ZH/W, donde ZH es altura de los edificios y W es el ancho de las calles. El valor se distorsiona con la presencia de árboles que reduzcan la visión del cielo entre calles.

⁴ Fracción de terreno impermeable por las características de construcción (edificios, carreteras, áreas impermeables, pavimentadas y otras).

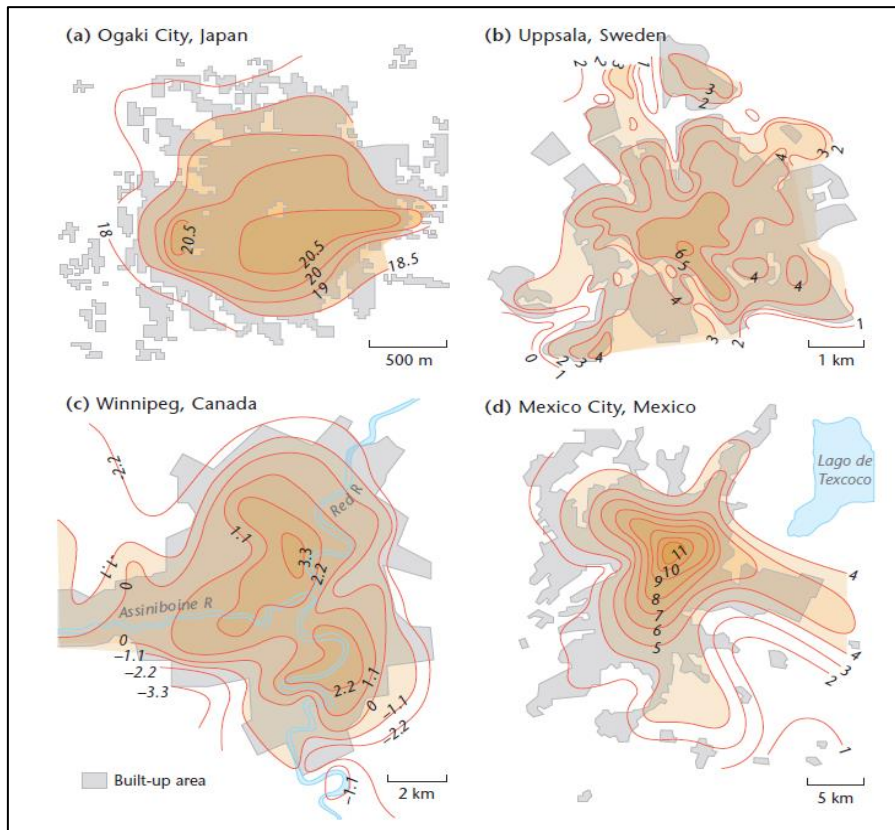
6.4. Islas de Calor Urbanas

La isla de calor urbana (ICU) se define como una anomalía por el cual las regiones urbanas experimentan temperaturas más cálidas que sus alrededores rurales. En una ciudad con un millón de habitantes o más la temperatura media anual del aire oscila entre 1 a 3° C. aunque el efecto puede disminuir a medida que disminuye la población. Este fenómeno se ve influenciado por el reemplazo del terreno abierto y la vegetación para el emplazamiento de carreteras, edificios y otras infraestructuras que generan un cambio en las superficies permeables (EPA, 2008).

El término “*urban heat island*” o “isla de calor urbana” fue introducido por Manley (1959) a través de su obra científica “*on the frequency of snowfall in metropolitan England*”, para referirse a una de las modificaciones climáticas más claras que causa la urbanización. A partir de aquí el término ha sido empleado por estudios que refieren al clima de la ciudad (Sarricolea, 2012).

Según Landsberg (1981) la ICU es el reflejo de la totalidad de los cambios micro climáticos generados por la alteración parcial o total del espacio urbano por la acción antrópica. Habitualmente, presenta una disposición concéntrica con las isothermas alrededor del núcleo urbano, a modo de isla en el centro, exhibiendo un máximo térmico y disminuyendo su temperatura de forma progresiva al acercarse a la periferia (ver figura 2) (Moreno, 2010). Sin embargo, Sarricolea *et al.* (2008) señalan que la configuración espacial que posee la ICU no es estable y su variabilidad temporal está relacionada con los cambios con la dinámica atmosférica regional y por determinadas condiciones meteorológicas.

Figura 2. Mapas de isotermas de ICU y su correspondencia con la forma y grado de desarrollo urbano de las ciudades de Ogaki-Japón (a); Uppsala-Suecia (b); Winnipeg-Canadá (c); y Ciudad de México-México (d)



Fuente: Oke *et al* (2017)

Blázs *et al.* (2009) indica que a medida que las ciudades se expanden y se implementan equipamientos como calles, edificios e industrias en el entorno urbano, se alteran las condiciones del ambiente y las temperaturas en la ciudad aumentan con respecto a sus entornos periurbanos o rurales. Al dar preferencia a las actividades industriales, los procesos económicos, el emplazamiento de calles, se da paso al desarrollo de un microclima artificial con repercusiones sobre las variables atmosféricas, que alteran el clima normal de la ciudad (Carrasco *et al.*, 2016).

Oke *et al.* (2017) sostiene que las causas fundamentales de la ICU se enmarcan en los cambios del balance energético producidos por el desarrollo urbano en el sitio pre-urbano sobre el que se construye la ciudad. A su vez, se suman otros factores complementarios como el albedo, los flujos de radiación, el clima, la localización geográfica, hora del día y estación, forma de la ciudad y la producción interna de calor a través de sistemas

domésticos de calefacción, aparatos eléctricos, etc. Por lo que, según Garau y Llop (2018), esta influencia permitiría explicar la estrecha relación entre la intensidad de la ICU y la urbanización de la ciudad (Garau, 2018).

En la actualidad todavía no existe un consenso asociado a la estacionalidad de la isla de calor. Aunque algunos autores como Eliasson (1994) señalan que es más intensa en verano, otros como Moreno-García (Moreno-García, 1999) indican que su intensidad se refleja más en invierno. No obstante, Sarricolea (2012) sostiene que este aspecto dependerá de las condiciones propias de la localización geográfica, del emplazamiento de la ciudad, su entorno y su climatología.

Moreno-García (1999) señala que la ICU puede ser definida a partir de tres parámetros básicos: intensidad, que corresponde a la máxima diferencia de temperatura que alcanza el máximo térmico de la capa de dosel, con respecto al entorno rural más cercano; configuración, que indica la distribución espacial de las isothermas; y el máximo térmico, que corresponde a las zonas donde se alcanza la mayor intensidad.

La magnitud de la ICU se ha evaluado mediante las diferencias máximas observadas, para un periodo determinado, entre la temperatura de un punto del centro de la ciudad y otro de su entorno periurbano (López Gómez *et al.*, 1991). Aunque en teoría no hay razón para elegir una zona rural sobre una urbana como referencia, lo fundamental es que la referencia sea un estándar de comparación estable y repetible. Por lo tanto, el sitio debe ser representativo de un entorno común y sus propiedades deben permanecer razonablemente fijas (Oke *et al.*, 2017).

Martin-Vide *et al* (2015) sostiene que la intensidad de la isla de calor puede medirse a través de la diferencia de temperatura entre las áreas urbanas y las áreas rurales, expresada a través de la siguiente fórmula:

$$\Delta T_{u-r} = T_u - T_r$$

donde:

ΔT_{u-r} es la intensidad de la isla de calor

T_u es la temperatura del área urbana

T_r es la temperatura del área rural.




Por lo tanto, es necesario adquirir una muestra del área urbana y rural que sirva para comparar el comportamiento de la temperatura. Sin embargo, el principal la selección de la muestra en muchas investigaciones ha representado un problema ya que no proporciona las condiciones ideales. Para que se pueda manifestar el efecto de la ciudad se requiere que los factores geográficos locales de ambas muestras sean similares.



Siguiendo las indicaciones de los mismos autores se proponen dos factores geográficos para el control de la muestra: la altitud y la distancia al mar. De acuerdo con Martin-Vide *et al.* (2015), sobre la base de algunas mediciones de la temperatura, una diferencia de altura de 30.8 m. podría generar variaciones de hasta 0.2 °C, lo que a su vez podría causar una sobreestimación o subestimación del efecto urbano, por lo cual se recomienda no superar una diferencia altitudinal de 30 metros.

Por otro lado, la distancia al mar y las fuentes húmedas regulan las temperaturas diarias y estacionales. En virtud de ello, Martin-Vide *et al.* (2015) sugieren distancia al mar de los puntos urbanos y no urbanos no deben superar los 800 m, ya que según Ninyerola *et al.* (2005) citado por Martin-Vide *et al.* (2015), el promedio anual indica que diferencias de distancias de 870 m, pueden generar variaciones de temperatura de 0,2 °C.

Oke *et al.* (2017) afirman que la topografía puede magnificar la intensidad de la ICU, debido a su influencia en el flujo de aire (por redirección del flujo de aire o efecto mecánico), la temperatura del aire (por la modificación del balance de energía superficial y generación de circulaciones térmicas, conocido como efecto termal) y la calidad potencial del aire (ver Tabla 2).

Tabla 2. Entornos topográficos comunes de ciudades y efectos meso y micro climáticos asociados.

| Escenario orográfico | Efecto mecánico | Efecto termal | Calidad del aire |
|--|---|---|---|
| <p>Clima de montaña</p>  | <p>La velocidad del viento aumenta debido a la elevación. La presencia de nubes y la precipitación es mayor.</p> | <p>En condiciones de tranquilidad, existe mayor irradiación solar y pérdida de radiación de onda larga. Existe un mayor rango diurno y de temperatura estacional.</p> | <p>Cuando hay viento se presenta buena calidad del aire, pero con potencial smog fotoquímico en días claros y tranquilos.</p> |
| <p>Pendiente</p>  | <p>Presencia de fuertes vientos (en el lado de sotavento) que descienden por la pendiente en determinadas circunstancias.</p> | <p>Si la orientación es hacia el sol, la superficie y el aire adyacente se calientan, causando vientos ascendentes por la pendiente (caso contrario ocurre cuando la orientación no es hacia el sol). Por la noche las pendientes más altas se enfrían más rápido y se producen vientos cuesta abajo.</p> | <p>Existe una buena calidad del aire, a menos que se encuentre en una zona de recirculación o cerca del nivel de inversión térmica.</p> |
| <p>Valle</p>  | <p>El efecto depende de la geometría del valle en relación con la dirección del viento. Si es perpendicular (alineado) al eje del valle, el valle puede estar protegido (expuesto).</p> | <p>Los vientos a través del valle se desarrollan durante el día debido a flujos anabáticos (menor densidad del aire y sube por las laderas) y durante la noche que son los catabáticos (mayor densidad del aire por el enfriamiento y bajan por la ladera). Los flujos catabáticos son más fuertes en la capa superficial nocturna de poca profundidad.</p> | <p>Calidad del aire muy pobre debido a la acumulación de aire fresco en el fondo del valle por la noche.</p> |
| <p>Base de pendiente</p> | <p>En el lado de sotavento puede ocurrir el efecto foehn dependiendo de la topografía local. En el lado de</p> | <p>Flujos anabáticos en horario diurno y catabáticos por las noches.</p> | <p>En barlovento, el aire frío se bloquea; en sotavento, algunas condiciones pueden crear remolino de</p> |

| | | | |
|---|--|---|--|
|  | barlovento, el flujo puede estar bloqueado contra la barrera. | | recirculación y una mala calidad del aire. |
| Costero  | Los vientos en la costa generados por tormentas son mucho más fuertes que las que se generan fuera de ella con las mismas condiciones. | En condiciones regionales tranquilas, se establece una circulación de brisa costera que lleva el aire a la zona costera durante el día. En cambio, por las noches se presentan flujos de aire fuera de la costa | La contaminación del aire durante el día es posible cuando las condiciones de la brisa marina dominan y causan una fuerte inversión cerca de la superficie |

Fuente: Wanner y Filliger (1989) modificado por Oke *et al.* (2017).

En el estudio de la ICU se pueden distinguir dos tipos: la isla de calor atmosférica, que representa las diferencias en la temperatura del aire entre las zonas urbanas y las rurales; y la isla de calor superficial, que indica las diferencias térmicas entre las superficies artificiales (pavimento, aceras, tejados de los edificios, etc.) y las naturales (vegetación, cultivos, roquedo) (Felipe Fernández & Martilli, 2012). Entre ambas se pueden observar diferencias en los mecanismos de formación, las técnicas empleadas para su identificación y las medidas de mitigación (ver cuadro 3).

Cuadro 3. Características básicas de las islas de calor superficial y atmosférica

| Características | Islas de calor superficial | Isla de calor atmosférica |
|--------------------------|--|---|
| Ritmo temporal | - Presente durante el día y la noche. - Mayor intensidad durante el día y en verano | - Débil o inexistente durante el día - Mayor intensidad durante la noche o después de la puesta del sol y en invierno |
| Picos de intensidad | - Gran variación espacial y temporal: - Durante el día de 10 °C a 15°C. - Durante la noche de 5°C a 10°C. | - Poca variación: - Durante el día de -1,8°C a 3°C Durante la noche de 5°C a 10°C - Durante la noche de 7°C a 12°C |
| Método de identificación | - Método indirecto - Teledetección | - Método directo - Estaciones meteorológicas fijas - Transectos |
| Representación | - Imagen térmica | - Mapas de isotermas - Gráficos térmicos |

Fuente: EPA, 2008; traducido

Aunque las temperaturas de la ICU son relativamente sencillas de medir, existen varios tipos de ICU con diferentes escalas temporales y espaciales, lo que hace que su estudio sea complejo. Cada uno responde a un conjunto diferente de escalas y requiere diferentes esquemas de monitoreo (Oke *et al.*, 2017).

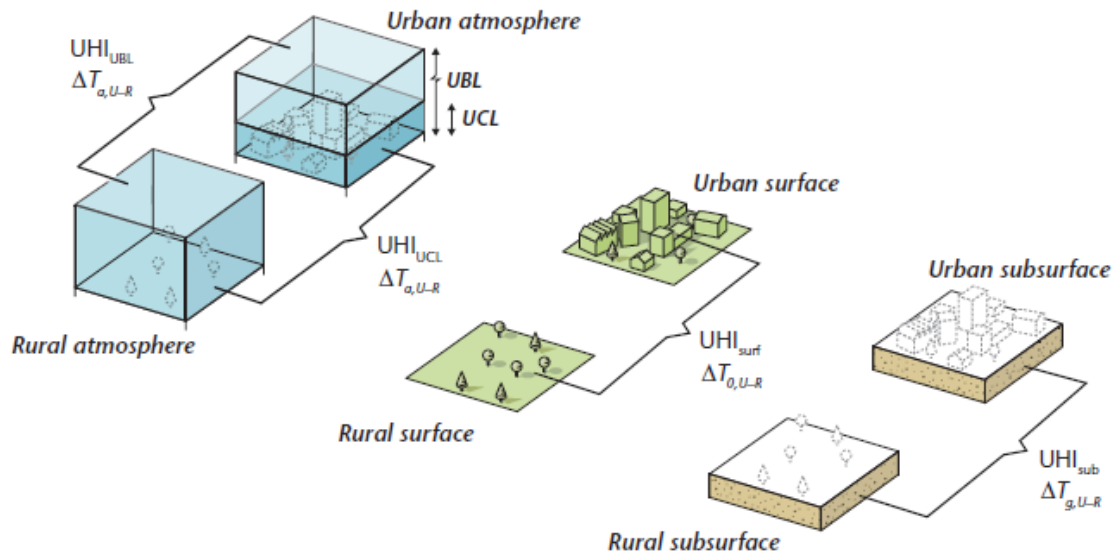
6.4.1. Tipos de islas de calor

Las islas de calor son una diferencia de temperatura entre las áreas urbanas y sus alrededores. La siguiente clasificación corresponde a los tipos de ICU propuesta por Oke (1995):

- ***Subsurface urban heat island* o Isla de calor urbana subsuperficial (ICU_{Sub}):** diferencia entre los patrones de temperatura en el suelo debajo de la ciudad, incluidos los suelos urbanos y el tejido construido subterráneo, y los del suelo rural circundante.
- ***Surface urban heat island* o Isla de calor urbano de superficie (ICU_{Sup}):** diferencia de temperatura en la interfaz de la atmósfera exterior con los materiales sólidos de la ciudad y la interfaz aire-tierra rural equivalente.
- ***Urban canopy layer* o capa de dosel isla de calor urbano (UCL):** diferencia entre la temperatura del aire contenido en la capa de dosel urbano y la altura correspondiente en la capa cercana a la superficie periurbana o rural.
- ***Urban boundary Layer* o Isla de calor urbano de la capa límite (UBL):** diferencia entre la temperatura del aire en la capa entre la parte superior de la UCL y la parte superior de la capa límite urbana (UBL), y la que se encuentra en elevaciones similares en la capa límite atmosférica de la región rural circundante.

Estos cuatro tipos de UHI surgen de diferencias en las tasas de enfriamiento y calentamiento urbano y rural en la superficie, en el sustrato y en el aire. Oke *et al.* (2017) sostiene que las alteraciones de estas tasas son causadas por cambios en el balance energético de la superficie (ver figura 3).

Figura 3. Ilustración de las diferencias de temperatura que forman los cuatro tipos de islas de calor urbano.



Fuente: Oke *et al.* (2017)

6.4.2. Isla de calor superficial (ICUs)

En los últimos decenios el fenómeno más importante de la climatología y la meteorología urbanas ha sido la isla de calor urbana cercana a la superficie, entendida como la diferencia en la temperatura de la superficie terrestre entre el área urbana y su área no urbana circundante (Oke *et al.*, 1991). Estas diferencias están controladas en un grado considerable por las propiedades térmicas características del paisaje natural.

En un caluroso y soleado día de verano, el sol puede superficies urbanas expuestas y secas al calor, como techos y pavimento, a temperaturas de 27°C a 50 °C más caliente que el aire, mientras que las superficies húmedas, más comunes en áreas rurales, permanecen cerca de las temperaturas del aire (EPA, 2008).

Aunque las islas de calor urbano de superficie suelen estar presentes de día y de noche, tienden a ser más fuertes durante el día cuando el sol está brillando (Berdahl & Bretz, 1997; EPA, 2008). En este sentido, Voogt y Oke (2003) afirman que la diferencia en las temperaturas diurnas de la superficie entre las áreas desarrolladas y rurales es de 10°C a

15°C); mientras que la diferencia en las temperaturas de la superficie durante la noche es típicamente menor, de 5°C a 10 °C.

La magnitud de las islas de calor urbano superficiales varía con las estaciones, debido a los cambios en la intensidad del sol, así como a la cobertura del suelo y al clima. Como resultado de tal variación, las islas de calor urbanas superficiales suelen ser más grandes en el verano (Oke, 1982; EPA, 2008).

Los factores que contribuyen a la formación de las islas de calor son muy variados. Sarricolea y Romero (2010), sobre la base teórica de Cuadrat *et al.*, (2003 y 2005) y otros autores, mencionan una lista de factores que deben ser abordados para un estudio completos de la intensidad de la ICUs:

- **Factores topográficos:** las características de elevación inciden en la intensidad y distribución de la temperatura al interior de las ciudades debido al poco dominio de los vientos.
- **Exposición de laderas:** La orientación de cada ladera de acuerdo con la rosa de los vientos (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO) más las superficies planas, cada una de ellas tendrá diferentes cargas de energía solar y contribuirá de diferente manera a la intensidad de la ICUs.
- **Distancia al mar y fuentes húmedas:** Las áreas pueden ser alcanzadas por masas de aire locales que se generan sobre el mar, ríos y humedales.
- **Humedad del suelo:** en espacios con alta humedad se produce evapotranspiración que favorece el enfriamiento de estructuras de la superficie y cercanas a ellas.
- **Reflectividad del suelo:** Esta variable refleja los cambios espaciales de la reflectividad de una imagen satelital, esto tiene relación a que las superficies que absorben mayor cantidad de radiación solar presentan temperaturas más altas.
- **Cobertura vegetal:** posee una relación inversa con las temperaturas superficiales, por lo que las temperaturas suelen ser más bajas que en las áreas edificadas.

-
- **Densidad de la población:** la mayor concentración de población en un lugar determinado junto con la rugosidad de las ciudades influye en el factor de visión del cielo aumentando la intensidad de las temperaturas

6.4.3. Impactos de la isla de calor

- **Mayor consumo de energía.**

El incremento de las temperaturas en verano en las ciudades conduce al aumento en la demanda de energía para refrigeración y añade presión a la red de energía eléctrica. Esta demanda máxima electricidad urbana aumenta de 1.5% y 2% por cada 0.6°C, de aumento en la temperatura de verano. El aumento constante de las temperaturas en el centro durante las últimas décadas ha revelado que del 5 al 10% de la demanda de energía de la comunidad se utiliza para compensar el efecto de la isla de calor (EPA, 2008).

- **Emisiones elevadas de contaminantes atmosféricos y gases de invernadero**

El aumento de la demanda de energía genera altos niveles de contaminación del aire y emisiones de gases de efecto invernadero. La mayoría de las centrales eléctricas incluyen dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado (PM), monóxido de carbono (CO) y mercurio (Hg). Estos contaminantes contribuyen a la polución del aire y a otros compuestos como la lluvia ácida (EPA, 2008).

Por otro lado, las plantas que funcionan con combustibles fósiles emiten gases de efecto invernadero (dióxido de carbono), que contribuyen al cambio climático global. Además de los aumentos en las emisiones al aire, las temperaturas del aire elevadas aumentan la tasa de formación de ozono a nivel del suelo, que se produce cuando el NO_x y los compuestos orgánicos volátiles (COV) reaccionan en presencia de la luz solar (EPA, 2008).

- **Riesgos para la salud humana**

El aumento de las temperaturas durante el día puede incidir en malestar general como dificultades respiratorias, calambres por calor y agotamiento, insolación no fatal y mortalidad. A su vez, también puede exacerbar el impacto de las olas de calor, que son períodos de clima anormalmente caluroso. El Centro para el Control de Enfermedades afirma que las muertes asociadas a la exposición excesiva al calor entre 1979 a 1999, En

Estados Unidos excede el número de muertes resultantes de huracanes, rayos, tornados, inundaciones y terremotos combinados con más de 8,000 muertes prematuras. EPA, 2008)

- **Deterioro de la calidad del agua**

La capacidad de contaminación hídrica asociada a las ICUs se refleja en la transferencia del exceso de calor desde superficies como pavimentos y techos hacia las aguas pluviales. En este ámbito, Roa-Espinosa *et al.* (2003) indican que algunas mediciones de campo de un estudio han demostrado que la escorrentía de las áreas urbanas ha sido 11-17°C más caliente que la escorrentía de un área rural cercana en los días de verano cuando las temperaturas del pavimento al mediodía eran de 11 a 19 °C por encima de la temperatura del aire. Estas aguas pluviales calentadas se drenan en las alcantarillas pluviales y eleva la temperatura del agua a medida que se libera en arroyos, ríos, estanques y lagos (EPA, 2008).

6.5. La Teledetección en la climatología

Los elementos de la naturaleza poseen una respuesta espectral propia conocida como signatura espectral. La teledetección comprende el estudio de las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas, y analiza las correlaciones existentes entre éstas y las características de los diferentes materiales de la superficie terrestre, empleando su signatura espectral (S. Romero & Romero, 2006).

En las últimas décadas la teledetección ha experimentado un renovado impulso, incorporando nuevos sensores y plataformas que han permitido la obtención de magnitudes geofísicas de considerable valor geográfico. En este abanico de variables, la temperatura terrestre (LST) ha sido el principal objeto de estudio ya que representa una fuente fundamental de información, tanto cualitativa como cuantitativa, acerca de los procesos que ocurren en la superficie terrestre. (Quattrochi & Luvall, 2004; Martínez-Barbáchano, 2020)

Actualmente la teledetección por satélite ofrece la oportunidad de caracterizar estructuras espaciales de temperatura de la superficie terrestre con suficiente resolución para distinguir entre centros urbanos y entornos rurales. Este desarrollo ha permitido ampliar las oportunidades de estudios en el campo de la climatología y ha introducido nuevos conceptos (Voogt & Oke, 2003)

Hasta ahora, existen varios estudios que utilizan satélites LST derivado para estudiar la isla de calor urbano superficial centrándose en una o varias grandes ciudades en una región, como más satélite. Existe un gran número de sensores remotos útiles para el estudio de la ICUs, tales como *Landsat TM* y *ETM+4*, *NOAA AVHRR*, *Terra ASTER* y *Terra MODIS*.(Sarricolea & Martín-Vide, 2014).

La percepción de los radiómetros de barrido multi-espectral de la serie de satélites *LANDSAT* se caracteriza por la homogeneización de la imagen que es función del nivel de resolución de los sensores o captores. Estos satélites se ubican en una órbita casi polar y poseen una resolución espacial de 79 m. A su vez, están provistos de sensores remotos de varios tipos, que permiten captar las señales analógicas y las convierten a formato digital:

- Sensor *RBU (Return Beam Vidicon)* que consiste en un sistema de cámaras de televisión.
- Equipo de barrido multiespectral o *MSS (Multispectral Scanner)* que registra la energía reflejada por la superficie terrestre en las regiones verde, roja e infrarroja del espectro electromagnético (S. Romero & Romero, 2006).

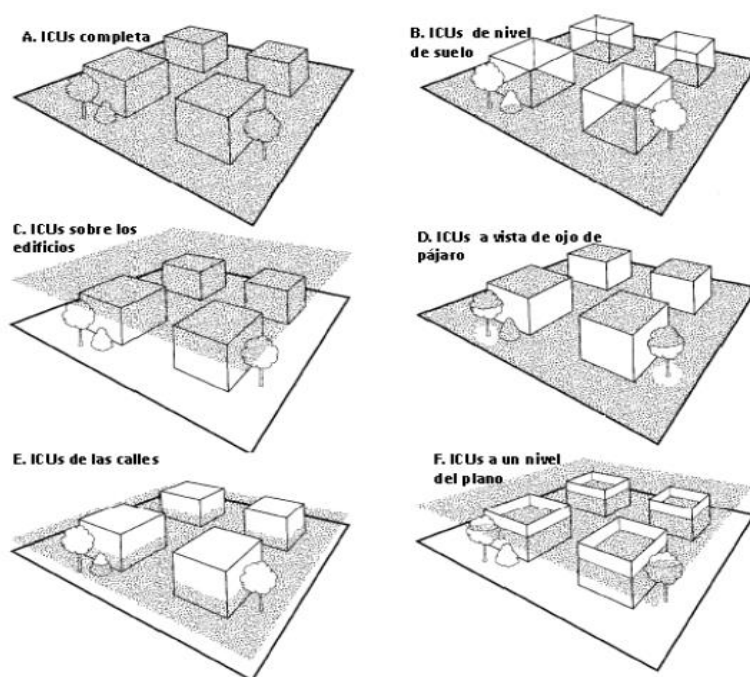
Los avances tecnológicos en la teledetección han proporcionado imágenes con mejoras sustanciales en la resolución espacial respecto a los satélites pioneros *Landsat 8* es un satélite multiespectral propiedad de la *National Aeronautics and Space Administration* operativo desde febrero de 2013 El equipo de detección remota posee incluye un radiómetro de barrido multicanal *OLI (Operational Land Imager)* y un radiómetro infrarrojo de dos canales *TIRS (Thermal Infrared Sensor)* (Masek *et al.* 2019; Aragoneses de la Rubia, 2020).

El instrumento *OLI*, opera en nueve longitudes de onda en el rango de 0.433-2.300 μm y proporciona imágenes con una resolución máxima de 15m. Mientras que la resolución espacial de las imágenes obtenidas con el instrumento *TIRS* es de 100m. Su objetivo es obtener las características de temperatura de la superficie y estudiar el proceso de transferencia de calor y humedad en el ámbito de la agricultura, la gestión del agua, etc. En contraste con el equipo instalado en satélites *Landsat* anteriores, *TIRS* posee la capacidad de realizar observaciones en dos combinaciones de 8 bandas de longitud de onda infrarroja (Masek *et al.* 2019; Aragoneses de la Rubia, 2020).

Curran (1985) citado por Sarricolea (2012b) señala que existen cuatro propiedades térmicas importantes de la superficie que pueden ser detectadas por sensores remotos: la capacidad térmica como una medida potencial de un cuerpo para almacenar calor; la conductividad térmica que mide el ritmo de transmisión de calor en un material; la difusividad térmica que es la velocidad de variación térmica en el volumen de un material y la inercia térmica que es el grado de respuesta a los cambios de temperatura.

Las primeras observaciones de la ICUs empleando sensores remotos fueron desarrolladas por Rao (1972) quien estudió la temperatura de la superficie urbana y su relación con la isla de calor. Posteriormente, entre los estudios de climas urbanos se destaca el uso de los sensores NOAA y las imágenes LANDSAT TM en el análisis de los fenómenos espaciales. En este sentido Voogt y Oke (1997) citados por Sarricolea (2012) sostienen que para complementar los análisis espaciales es necesario realizar mediciones en terreno y así conocer la “temperatura urbana completa” (ver figura 4)

Figura 4. Esquema de temperaturas superficiales.



Fuente: Voogt y Oke (1997) modificado por Sarricolea (2012)

6.6. Efectos de la vegetación sobre el calor superficial

La vegetación posee un papel fundamental en la regulación del microclima urbano, ya que actúa como un regulador de la temperatura minimizando las agresiones ambientales. Algunas funciones específicas que cumple el arbolado urbano influyen significativamente en el clima local por medio de la evapotranspiración, disminuyendo la temperatura del aire y reducen el calentamiento de las superficies por radiación solar (Flores-De la O *et al.*, 2018).

La cantidad de luz solar transmitida a través del dosel varía en función de la especie de planta. Generalmente durante el verano el 10% al 30% de la energía del sol llega al área debajo de un árbol, el resto es utilizado para la fotosíntesis, y parte se refleja de regreso a la atmósfera. Mientras que, en invierno, el rango de la luz solar transmitida a través de un árbol es mucho más amplio, del 10% al 80%, ya que los árboles perennifolios y deciduos poseen un follaje de invierno diferente (EPA, 2008).

La sombra de los árboles la temperatura puede ser casi 3°C más baja que en el sol en las mismas condiciones. Estas superficies más frías, a su vez, reducen el calor transmitido

a los edificios y la atmósfera. En este contexto, Romero (2001) citada por Cárdenas-Celis (2019) indica que las variaciones térmicas se presentan de acuerdo con el agrupamiento de arborización en la morfología urbana, sumada a las variables externas del clima como las estaciones del año (ver Tabla 3).

Tabla 3. Variaciones de temperatura (°C) en espacios abiertos de acuerdo con el agrupamiento de arborización.

| Orientación | Verano | Otoño | Primavera | Invierno |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Arboles aislados | -3.7 a -1.3 | --- | --- | -8.0 a -1.0 |
| Agrupamiento heterogéneo | -4.4 | -3.6 a -2.8 | --- | -5.0 |
| Agrupamiento homogéneo | -4.7 | -3.1 | -3.7 a -3.2 | -5.1 |

Fuente: Cárdenas-Celis (2019)

La disposición, densidad y agrupamiento de los árboles tienen influencia en las reducciones de temperatura. Este fenómeno se debe a la obstrucción de la radiación solar directa y al enfriamiento radiactivo durante el periodo de la noche, colaborando con el confort térmico urbano (Cárdenas-Celis, 2019).

Los árboles y la vegetación absorben agua a través de sus raíces y la emiten a través de sus hojas, movimiento conocido como "transpiración. Por otro lado, la evaporación, también ocurre en el suelo alrededor de la vegetación y en los árboles cuando interceptan la lluvia en las hojas y otras superficies. Juntos, estos procesos se conocen como evapotranspiración, fenómeno que permite enfriar el entorno utilizando el calor del aire para evaporar el agua (EPA, 2008).

La evapotranspiración, sola o en combinación con la sombra, puede ayudar a reducir las temperaturas máximas del aire en verano. Varios estudios, entre los que destacan Huang *et al.* (1990) y Kurn *et al.* (1994) han medido las siguientes reducciones:

- Temperaturas máximas del aire en arboledas que son 5°C más frías que en terreno abierto.
- Temperaturas del aire sobre campos agrícolas irrigados que son 3°C más frías que el aire sobre suelo desnudo.

-
- Áreas suburbanas con árboles maduros que son de 2 a 3°C más frías que los suburbios nuevos sin árboles.
 - Temperaturas sobre campos deportivos de pasto que son de 1 a 2°C más frías que en las áreas limítrofes.

7. PLANTEAMIENTO METODOLOGICO

Para el desarrollo metodológico del presente estudio se realizó la extracción de información e imágenes satélites a partir de la plataforma de “*Google Earth Engine*”, para luego ser procesadas a través del software “*ArcGis 10.4.1*”. y su visualizador “*ArcMap*”. El marco metodológico se describe a continuación:

7.1. Identificación del área urbana del Cantón.

Con la información obtenida previamente a partir de la plataforma en nube del conjunto de datos espaciales “*Google Earth Engine*”, y usando el software de “*Arcgis 10.4.1*,” a través de su visualizador *ArcMap*, se incorporarán las capas limítrofes de la zona urbana del Cantón, proporcionadas por la Dirección de Planificación Estratégica del Municipio de Manta.

7.2. Identificación de áreas rurales del Cantón.

La selección de las áreas rurales se realizará a partir de los criterios topográficos de identificación de áreas propuestos por Sarricolea & Martin-Vide (2014). Uno de ellos corresponde al rango altitudinal, que debe ser similar al rango de alturas de las áreas urbanas, para lo cual se sugiere no superar una diferencia altitudinal de 30 metros; mientras que el otro factor es el rango de pendientes, que deberán ser iguales a las presentes en el área urbana.

El cálculo de alturas para las áreas urbanas será realizado a partir del conjunto de datos de elevación digital “*Shuttle Radar Topography Mission*” (SRTM), obtenidos a través del editor de códigos de la plataforma en nube “*Google Earth Engine*”. Se programarán los datos SRTM mediante el uso del lenguaje *JavaScript* y se aplicará un filtro de la información empleando un polígono en los alrededores de los límites urbanos del Cantón. Los datos

obtenidos serán incorporados al software “ArcMap 10.4.1”. para su procesamiento y obtención de las alturas máximas y mínimas.

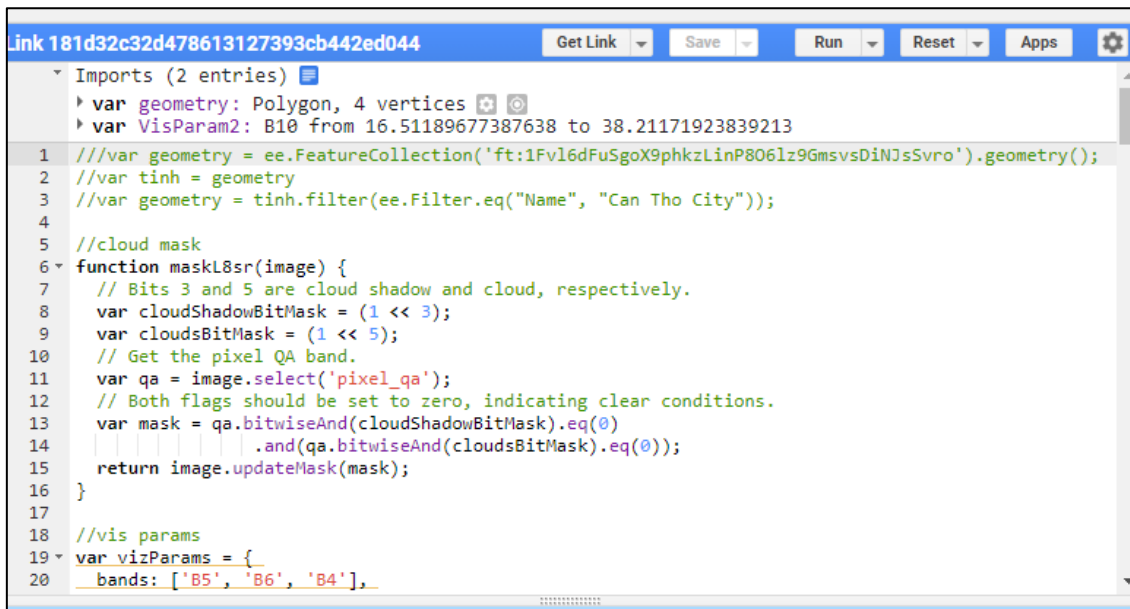
7.3. Preparación de los códigos para extracción de imágenes satelitales.

A través de la plataforma geomática “Google Earth Engine” se prepararán los códigos para la obtención de un promedio anual de imágenes satelitales del Cantón de temperatura e índices diferenciado de vegetación normalizada para el rango de años 2015-2021.

7.4. Control de variables atmosféricas – nubosidad.

A efectos de evitar la sobrestimación o subestimación efectos de la reflectancia solar y mantener el control de las condiciones atmosféricas de nubosidad se empleará la función “CloudMask” cuyo indicador deberá mantener en cero para asegurar las condiciones de claridad requeridas (ver Figura 5).

Figura 5. Control de condiciones de nubosidad



```
Link 181d32c32d478613127393cb442ed044  Get Link Save Run Reset Apps
Imports (2 entries)
  var geometry: Polygon, 4 vertices
  var VisParam2: B10 from 16.51189677387638 to 38.21171923839213
1 //var geometry = ee.FeatureCollection('ft:1Fv16dFuSgoX9phkzLinP8061z9GmsvsDjNjsSvro').geometry();
2 //var tinh = geometry
3 //var geometry = tinh.filter(ee.Filter.eq("Name", "Can Tho City"));
4
5 //cloud mask
6 function maskL8sr(image) {
7   // Bits 3 and 5 are cloud shadow and cloud, respectively.
8   var cloudShadowBitMask = (1 << 3);
9   var cloudsBitMask = (1 << 5);
10  // Get the pixel QA band.
11  var qa = image.select('pixel_qa');
12  // Both flags should be set to zero, indicating clear conditions.
13  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0)
14             .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0));
15  return image.updateMask(mask);
16 }
17
18 //vis params
19 var vizParams = {
20   bands: ['B5', 'B6', 'B4'],
```

7.5. Selección de puntos No Urbanos

Ya que la isla de calor superficial diurna se define a partir de la diferencia entre temperaturas de áreas urbanas y rurales, se requiere extraer una muestra del área rural que permita comparar el comportamiento de la temperatura y así medir su intensidad.

Mediante la herramienta “*point*” del software de “*ArcMap*” se marcará la posición de las zonas de menor temperatura superficial. Posteriormente se integrarán los criterios de selección propuestos por Martin-Vide *et al.* (2015), quienes proponen una serie de condiciones geográficas ideales para localizar la muestra.

Manta es una ciudad costera ubicada en el extremo occidental de América del Sur sobre el Océano Pacífico, sus temperaturas se ven influenciadas por las corrientes frías del Pacífico y la brisa marina. Según los autores la cercanía con el mar y fuentes húmedas son un factor decisivo ya que puede regular las diferencias de temperaturas, por lo que la distancia al mar de los puntos no urbanos no deben diferir en más de 800 m (Martin-Vide *et al.*, 2015).

Para establecer la proximidad hacia el perfil costero se empleará la herramienta “*near*” del software de *ArcMap*, para medir la distancia más corta entre los “*shapefiles*”. Se ingresarán los puntos urbanos y no urbanos, y se utilizará un archivo de polilínea que corresponde al perfil costero del Cantón. Por lo tanto, la proximidad al perfil costero quedará registrada en la tabla de atributos de los puntos no urbanos.

Es importante destacar que, debido a que las micro cuencas del Cantón mantienen un potencial de escurrimiento, por lo que la mayor parte del año los ríos permanecen secos, no se tomará en cuenta esta variable como parte de las fuentes de humedad.

Para procesar los valores correspondientes a las alturas y temperatura superficial se empleará la opción “*extract multi values to points*” del software de *ArcMap*, que permitirá añadir los datos de las elevaciones y la temperatura superficial a los previamente puntos creados. De esta manera quedará guardado en los registros de los puntos la información correspondiente a distancia al mar, altitud y temperatura superficial.

7.6. Cálculo de “*Land Surface Temperature*” (LST)

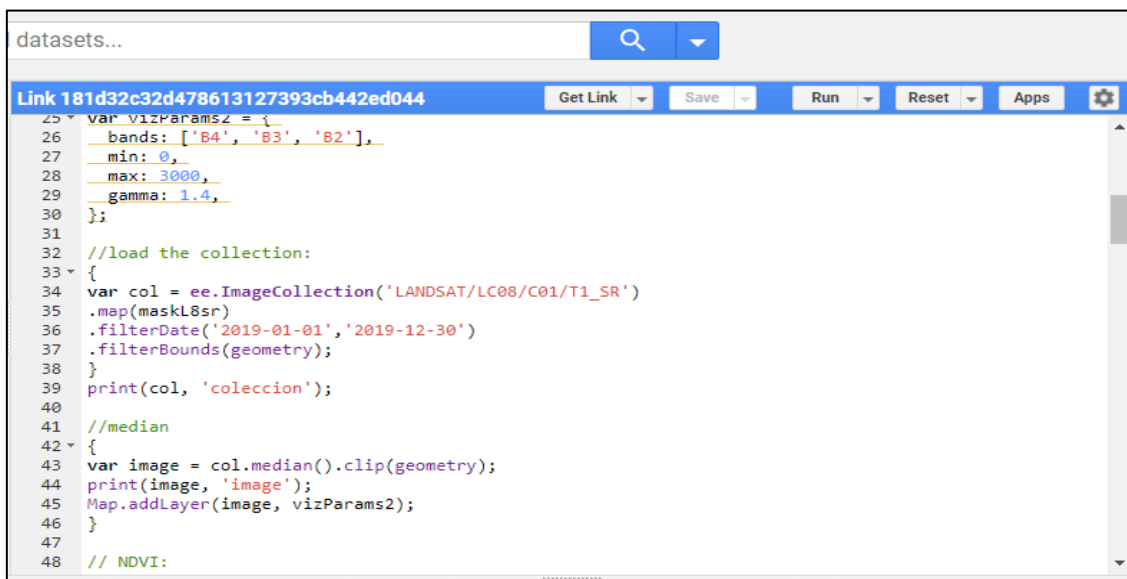
La temperatura de la superficie terrestre (LST) es un indicador fundamental para el estudio de algunos procesos naturales como el balance de radiación neto en la superficie

terrestre, el monitoreo del estado de la vegetación, análisis del efecto invernadero y otros procesos en de superficie a escalas locales y globales. Las mediciones de LST por satélite proporcionan datos únicos para la cobertura regional y global con una resolución temporal y espacial bastante buenos (Li & Duan, 2018).

Para el caso práctico de la presente investigación se realizará una estimación de la temperatura superficial a partir de la recolección de datos de sensores remotos, por medio de la plataforma en nube “*Google Earth Engine*”, a través del “*code editor*” (donde se ingresan los comandos de programación *JavaScript*) para cargar las colecciones de imágenes LANDSAT 8.

Se ingresará un archivo vectorial correspondiente a la totalidad de la superficie del Cantón para luego trazar un polígono y así extraer la información requerida. A partir del comando “*filterdate*” se calculará el promedio de la temperatura superficial del suelo (LST) para los años 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021 (ver figura 6 y figura 7).

Figura 6. Promedio de temperatura



```
Link 181d32c32d478613127393cb442ed044 Get Link Save Run Reset Apps
25 var vizParams2 = {
26   bands: ['B4', 'B3', 'B2'],
27   min: 0,
28   max: 3000,
29   gamma: 1.4,
30 };
31
32 //load the collection:
33 {
34 var col = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR')
35 .map(maskL8sr)
36 .filterDate('2019-01-01','2019-12-30')
37 .filterBounds(geometry);
38 }
39 print(col, 'coleccion');
40
41 //median
42 {
43 var image = col.median().clip(geometry);
44 print(image, 'image');
45 Map.addLayer(image, vizParams2);
46 }
47
48 // NDVI:
```

Figura 7. Cálculo *Land Surface Temperature* (LST)

```
nk 181d32c32d478613127393cb442ed044 Get Link Save Run Reset Apps
133
134 var LST = thermal.expression(
135   '(Tb/(1 + (0.001145* (Tb / 1.438))*log(Ep)))-273.15', {
136     'Tb': thermal.select('B10'),
137     'Ep': EM.select('EMM')
138   });
139 //LST c,d,f, p1, p2, p3 are assigned variables to write equaton easily
140 /* var c= ee.Number(1);
141    var d= ee.Number(0.00115);
142    var f= ee.Number(1.4388);
143
144
145 var p1= ee.Number(thermal.multiply(d).divide(f));
146 var p2= ee.Number(Math.log(EM));
147 var p3= ee.Number(p1.multiply(p2).add(c));
148
149
150 var LST= (thermal.divide(p3)).rename('LST');
151
152 var LSTimage = ee.Image(LST);*/
153 {
154 var min = ee.Number(LST.reduceRegion({
155   reducer: ee.Reducer.min(),
156   geometry: geometry,
157   scale: 30,
158   maxPixels: 1e9
159 }).values().get(0));
160 print(min, 'min');
161 var max = ee.Number(LST.reduceRegion({
162   reducer: ee.Reducer.max(),
163   geometry: geometry,
164   scale: 30,
165   maxPixels: 1e9
166 }).values().get(0));
167 print(max, 'max')
168 }
169
170 Map.addLayer(LST, VisParam2, 'LST');
171
```

Finalmente, la información será exportada a “*google drive*”, estableciendo el nombre respectivo de la variable, el archivo de salida, la carpeta de destino en la que se guardará en drive, la resolución del píxel, la geometría de referencia y el máximo de pixeles (ver figura 8).

Figura 8. Extracción LST desde la plataforma de Google Earth Engine

```
d datasets...
Link 181d32c32d478613127393cb442ed044 Get Link Save Run Reset Apps
162   reducer: ee.Reducer.max(),
163   geometry: geometry,
164   scale: 30,
165   maxPixels: 1e9
166   }).values().get(0));
167 print(max, 'max')
168 }
169
170 Map.addLayer(LST, VisParam2, 'LST');
171
172
173
174
175 Export.image.toDrive
176 ({
177   image: LST,
178   description: 'LST19',
179   region: geometry,
180   folder: 'GEE_manta',
181   scale: 30,
182   fileFormat: 'GeoTIFF',
183   maxPixels: 120430006194
184 });
185
```

7.7. Cartografía de las islas de calor

Los productos que resulten del paso anterior serán el insumo base que permitirá establecer los patrones espaciales e intensidades de las islas de calor superficial diurna. Previo al procesamiento y generación de las islas de calor, se realizará una extracción de las áreas de interés del ráster mediante la herramienta “*extract by mask*”. Como referencia se utilizará la capa de límites urbano y rural del Cantón, para obtener las zonas claramente delimitadas.

Una vez definida la imagen de la temperatura superficial del área urbana, será sometida a la herramienta matemática “*Minus*” de “*ArcMap*”, en donde se aplicará la diferencia temperaturas con la imagen LST de la zona rural. En la sección “*Input raster o constant value 1*” se ingresará la imagen ráster de temperatura superficial de la zona urbana, mientras que, en la sección “*Input raster o constant value 2*” se ingresará el valor inmediato de la temperatura más baja identificada de la zona rural.

7.8. Reclasificación

Posterior a la diferencia de las temperaturas, se dará paso a una reclasificación de los valores resultantes. Para esto se empleará la herramienta “*Reclassify*” del software de “*ArcMap*”, con el fin de generar rangos de temperatura de acuerdo con la categorización propuesta por Fernández (1996) citado por Sarricolea (2012) (ver Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación de intensidades de islas de calor urbana

| Rango de intensidad ICUs | Categoría |
|---------------------------------|----------------------|
| -1° - 0° | Irrelevante |
| 0° - 2° | Muy débil |
| 2° - 3° | Débil |
| 3° - 4° | Moderadamente débil |
| 4° - 5° | Moderada |
| 5° - 6° | Moderadamente fuerte |
| 6° - 7° | Fuerte |
| 7° y más | Muy fuerte |

Fuente: Elaboración propia a partir de Fernández (1996) modificado.

7.9. Variables geográficas

Las variables geográficas serán definidas a partir de los criterios considerados por Sarricolea *et al.*, (2008), que corresponden a la distancia al mar, NDVI (-1 a 1) y altitud en m.s.n.m. A su vez, se complementará con las variables de exposición a laderas y la densidad poblacional, sugeridas en la investigación de Sarricolea & Romero (2010).

7.9.1. Índice de diferencia de vegetación normalizada (NDVI)

El índice de diferencia normalizada de vegetación o “*Normalized Difference Vegetation Index*” por sus siglas en inglés (NDVI), proporciona la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación y es útil para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, así como también para analizar de patrones en los cambios estacionales y de crecimiento (Aguilar *et al.*, 2014).

Los resultados obtenidos entre el rango de -1 a 0 hacen referencia a la cobertura de suelos o agua, mientras que los valores que se encuentran entre 0 y 1 hacen referencia a la cobertura vegetal resaltando que los valores más cercanos a 1 indican vegetación sana. Su método de cálculo se obtiene a partir de las bandas 4 y 5 para una imagen Landsat 8, la formula implementada para obtener este resultado es:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

Donde:

NDVI es el índice diferencial de vegetación normalizada;

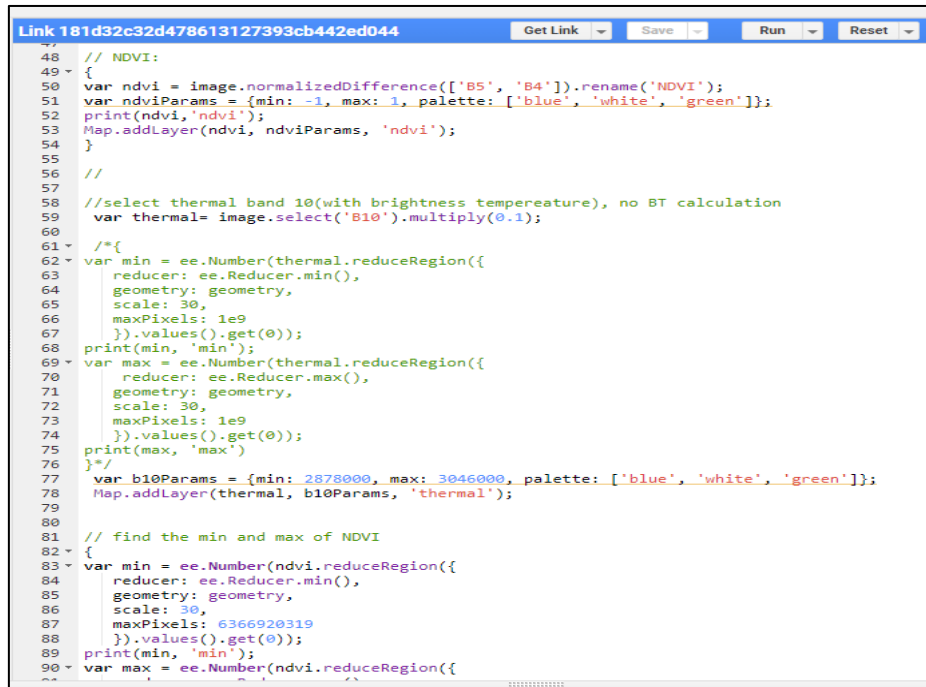
NIR hace referencia a la banda del infrarrojo cercano;

R a la banda del rojo; esto con el fin de identificar en el área urbana la presencia o ausencia de la cobertura vegetal urbana.

Para el presente caso de estudio el índice de vegetación se realizará a partir de los datos disponibles en la plataforma en nube “*Google Earth Engine*”, a través del “*code editor*”, utilizando los comandos del lenguaje de programación “*JavaScript*”. Al igual que en el procedimiento para la estimación de la temperatura superficial, en primera instancia se cargarán las colecciones las imágenes NDVI para el promedio de los años 2015, 2016,

2017, 2018, 2019, 2020, 2021. Inmediatamente, a través de la función “*FilterDate*” se realizará un filtro por fechas que corresponden a los promedios anuales (ver figura 9).

Figura 9. Cálculo “*Normalized Difference Vegetation Index*” (NDVI).



```
Link 181d32c32d478613127393cb442ed044  Get Link Save Run Reset
48 // NDVI:
49 {
50 var ndvi = image.normalizedDifference(['B5', 'B4']).rename('NDVI');
51 var ndviParams = {min: -1, max: 1, palette: ['blue', 'white', 'green']};
52 print(ndvi, 'ndvi');
53 Map.addLayer(ndvi, ndviParams, 'ndvi');
54 }
55
56 //
57
58 //select thermal band 10(with brightness temperature), no BT calculation
59 var thermal= image.select('B10').multiply(0.1);
60
61 /*{
62 var min = ee.Number(thermal.reduceRegion({
63   reducer: ee.Reducer.min(),
64   geometry: geometry,
65   scale: 30,
66   maxPixels: 1e9
67 }).values().get(0));
68 print(min, 'min');
69 var max = ee.Number(thermal.reduceRegion({
70   reducer: ee.Reducer.max(),
71   geometry: geometry,
72   scale: 30,
73   maxPixels: 1e9
74 }).values().get(0));
75 print(max, 'max')
76 }*/
77 var b10Params = {min: 2878000, max: 3046000, palette: ['blue', 'white', 'green']};
78 Map.addLayer(thermal, b10Params, 'thermal');
79
80
81 // find the min and max of NDVI
82 {
83 var min = ee.Number(ndvi.reduceRegion({
84   reducer: ee.Reducer.min(),
85   geometry: geometry,
86   scale: 30,
87   maxPixels: 6366920319
88 }).values().get(0));
89 print(min, 'min');
90 var max = ee.Number(ndvi.reduceRegion({
```

Finalmente, mediante la función “*export.image*”, se exportará la información resultante a “*google drive*” mencionando el nombre del archivo a extraer, el nombre del archivo final, la carpeta de destino, resolución de la imagen, geometría del lugar que se extraerá la información y número de píxeles (ver figura 10)

Figura 10. Extracción de datos NDVI



```
Link 181d32c32d478613127393cb442ed044  Get Link Save Run Reset Apps
178 description: 'NDVI19',
179 region: geometry,
180 folder: 'GEE_manta',
181 scale: 30,
182 fileFormat: 'GeoTIFF',
183 maxPixels: 1204300006194
184 });
185
186
187 Export.image.toDrive
188 ({
189   image: ndvi,
190   description: 'NDVI19',
191   region: geometry,
192   folder: 'GEE_manta',
193   scale: 30,
194   fileFormat: 'GeoTIFF',
195   maxPixels: 1204300006194
196 });
```

Una vez exportada la información será procesada a través del software de ArcMap y posteriormente se aplicará una clasificación de la vegetación en base al rango del NDVI (ver tabla 5).

Tabla 5. Criterios para lo zonificación de la cobertura vegetal mediante los valores NDVI

| Rango de NDVI | |
|----------------------|-----------------------------------|
| < 0 | Presencia de agua / sombras |
| 0 – 0,2 | Suelo desnudo |
| 0,2 – 0,4 | Vegetación escasa + suelo desnudo |
| 0,4 – 0,6 | Vegetación dispersa |
| 0,6 – 0,8 | Vegetación semi densa |
| > 0,8 | Vegetación densa |

Fuente: elaboración propia a partir de Olivio (2017)

7.9.2. Exposición a laderas

A partir del modelo de elevación se procesará la información a través de la herramienta de análisis espacial llamada “*Aspect*”, con el fin de calcular las exposiciones de las laderas.

7.9.3. Distancia al mar

Para la estimación de esta variable se empleará la herramienta de *ArcMap* llamada “*Euclidean Distance*”. Se ingresará un archivo de polilínea que corresponde al perfil costero del Cantón y se genera un *ráster* con las distancias a la delimitación del mar.

7.9.4. Altitud

Esta variable quedó definida en el punto 7.2.

7.9.5. Densidad poblacional

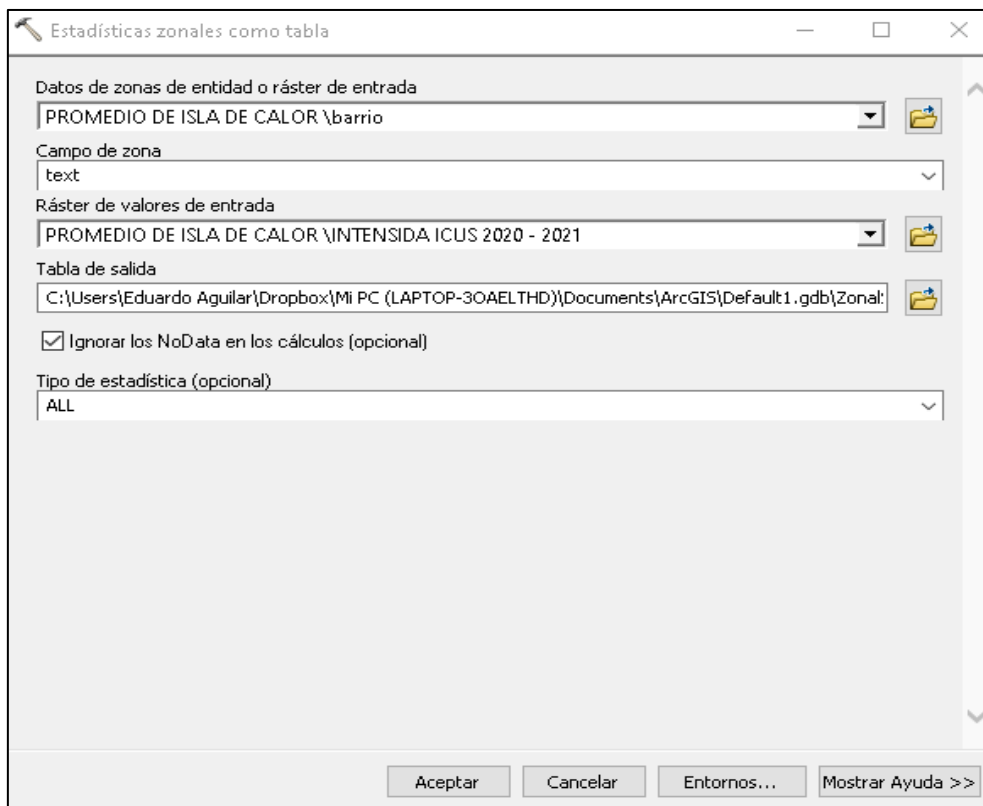
Esta variable será definida a partir del archivo vectorial de las manzanas censales 2014 obtenidas a través de la Municipalidad local, misma que contiene el número de habitantes por manzanas. El archivo será transformado en formato puntos con la herramienta de

conversión “*feature to point*” y posteriormente se empleará la herramienta “*kernel density*” donde se ingresarán los centroides obtenidos y se selecciona el campo que contiene la cantidad de habitantes. La unidad de salida es habitantes/km²

7.10. Coeficiente de Correlación de *Pearson* y Modelo de Regresión lineal múltiple

Para establecer el coeficiente de correlación de Pearson y el modelo de regresión lineal múltiple y así conocer determinadas características del área en estudio, primeramente, se convertirá la información ráster de la temperatura superficial y cada una de las variables geográficas en una estadística zonal con base en la capa vectorial de los barrios del Cantón mediante la herramienta “*Zonal Statistics as Table*”, la cual permitirá conocer la concentración media de la intensidad de la isla de calor superficial diurna y los barrios donde alcanzan las mayores intensidades de calor y el mínimo valor (ver figura 11).

Figura 11. Herramienta de análisis espacial “*zonal statistics as table*”



Los archivos obtenidos serán exportados y convertidos a formato texto para ser procesados, ordenados y agrupados en Excel. Una vez convertidos los datos, mediante la herramienta “análisis de datos” de Microsoft Excel, se aplicará la opción “coeficiente de

correlación” (ver figura 12). Para conocer la relación intuitiva de los resultados se empleará una escala numérica asociada a una escala cualitativa (ver tabla 6).

Figura 12. Función de coeficiente de correlación para análisis de datos Excel

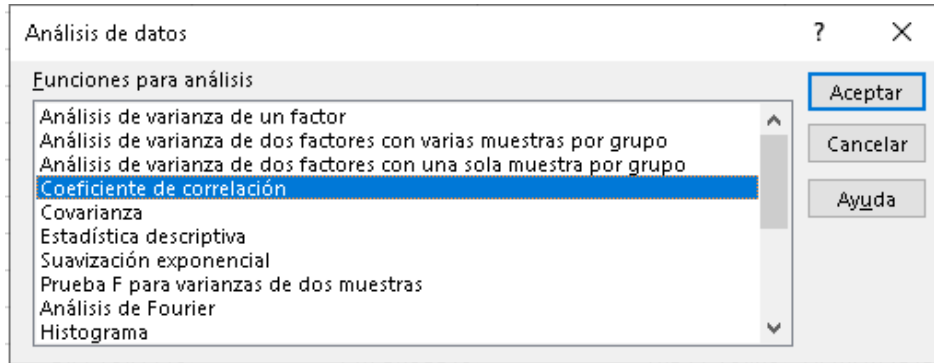


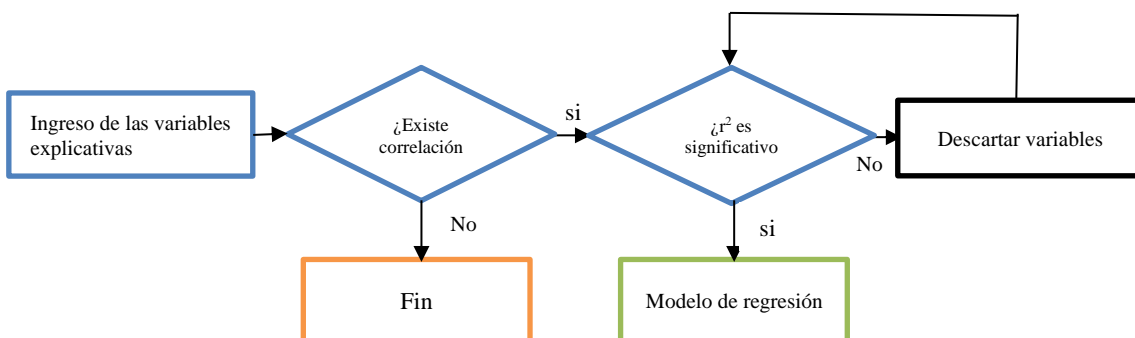
Tabla 6. Escala de interpretación del coeficiente de correlación de Pearson

| Rango | Escala cualitativa |
|-------------|-------------------------|
| 0 – 0.25 | Escasa o nula |
| 0.26 – 0.50 | Débil |
| 0.51 – 0.75 | Entre moderada y fuerte |
| 0.76 – 1.00 | Entre fuerte y perfecta |

Fuente: Ortega-Martínez *et al.* (2009)

Posteriormente, se aplicará la opción “regresión”. La variable dependiente “Y” corresponde a la temperatura superficial, mientras que las variables independientes o condicionantes “X” fueron la distancia al mar, altitud, NDVI, exposición a laderas y densidad de población (ver figura 13).

Figura 13. Flujo de trabajo con regresión múltiple



8. RESULTADOS

8.1. Selección de los puntos de muestreo

Previo al cálculo de las diferencias térmicas urbanas y no urbanas, se ubicó el punto de muestreo para la zona no urbana en sujeción a los criterios físicos propuestos por Martín-Vide *et al.* (2015) tales como la elevación topográfica y la distancia al mar. La aplicación de estas características permitió identificar un sitio en la zona no urbana con las condiciones físicas similares a la zona urbana, registrando una distancia a la costa y una altura diferente en cada periodo.

Tabla 7. Valores para criterios físicos del punto no urbano

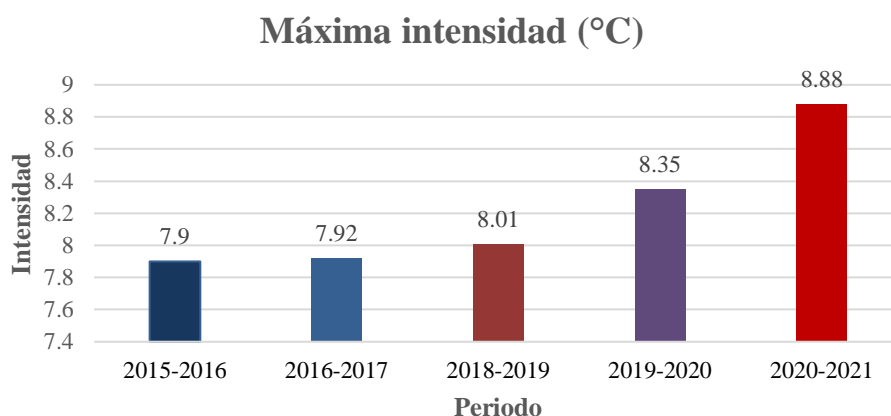
| Periodos | Punto no urbano | | |
|-------------|------------------|-------------------|----------------------|
| | Temperatura (°C) | Altura (m.s.n.m.) | Distancia al mar (m) |
| 2015 - 2016 | 25.15 | 20.00 | 497.44 |
| 2016 - 2017 | 24.09 | 28.97 | 145.6 |
| 2017 - 2018 | s/d | s/d | s/d |
| 2018 - 2019 | 24.20 | 58.56 | 713.68 |
| 2019 - 2020 | 24.60 | 45.84 | 446.05 |
| 2020 - 2021 | 21.32 | 34.93 | 713.68 |

8.2. Diferencias térmicas urbanas y no urbanas.

Se calcularon las temperaturas urbanas y no urbanas para los 6 periodos propuestos a partir de las imágenes satelitales obtenidas desde la plataforma de Google Earth Engine. La zona urbana del Cantón se mantiene más caliente que la zona no urbana, constatando una diferencia de temperatura promedio entre 5.90°C y 2.61°C. Es importante precisar que, si bien el periodo 2017-2018 fue considerado para el planteamiento del presente estudio, su imagen satelital respectiva no fue posible procesar debido a los elevados índices de nubosidad durante dicho periodo, por lo que no formó parte de los cálculos desarrollados durante el proceso.

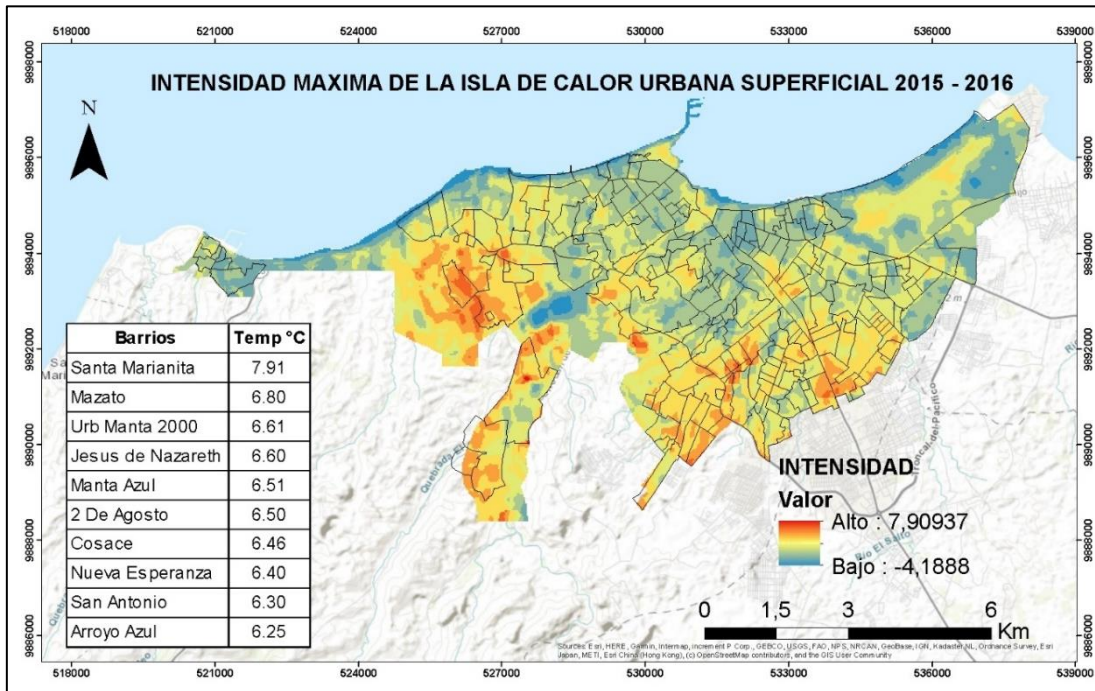
Con base en las intensidades de las islas de calor registradas, se generó una clasificación ordenada de forma ascendente que permite conocer los periodos más cálidos hasta los más fríos (ver Gráfico 4).

Gráfico 4. Intensidades de las islas de calor urbanas de superficie



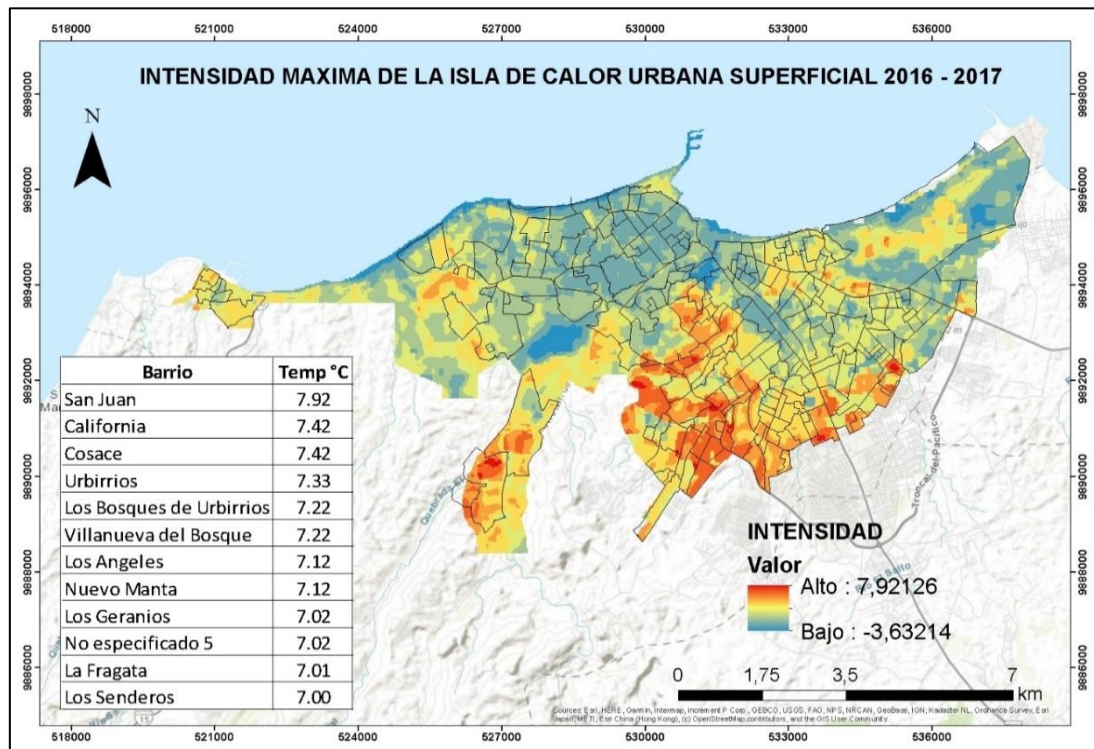
Los resultados permiten evidenciar que la isla de calor urbana superficial de menor intensidad se registró en el periodo 2015-2016, cuya temperatura alcanzó una intensidad máxima de 7.90°C, ubicándose en la categoría “muy fuerte” de acuerdo a la clasificación de intensidades de islas de calor de la tabla 4. Pese a esto, se visualiza predominio de intensidades moderadas y moderadamente débiles. Las zonas más cálidas se concentran hacia el sur/este y sur/oeste del área urbana y poseen una configuración poli-concéntrica; mientras que las zonas con intensidades moderadas cubren gran parte de la superficie del territorio urbano; y las zonas con temperaturas más débiles tienden a concentrarse próximas al perfil costero (ver Figura 14). Los sectores más cálidos (con temperaturas superiores a los 6°C) fueron: Santa Marianita, Mazato, Urbanización Manta 2000, Jesús de Nazareth, Manta Azul, 2 de agosto, COSACE, Nueva Esperanza, San Antonio, Arroyo Azul, Los Senderos, Ignacio Loyola, Los Angeles y María Auxiliadora II.

Figura 14. Intensidad máxima de la isla de calor urbana superficial del Cantón Manta periodo 2015-2016



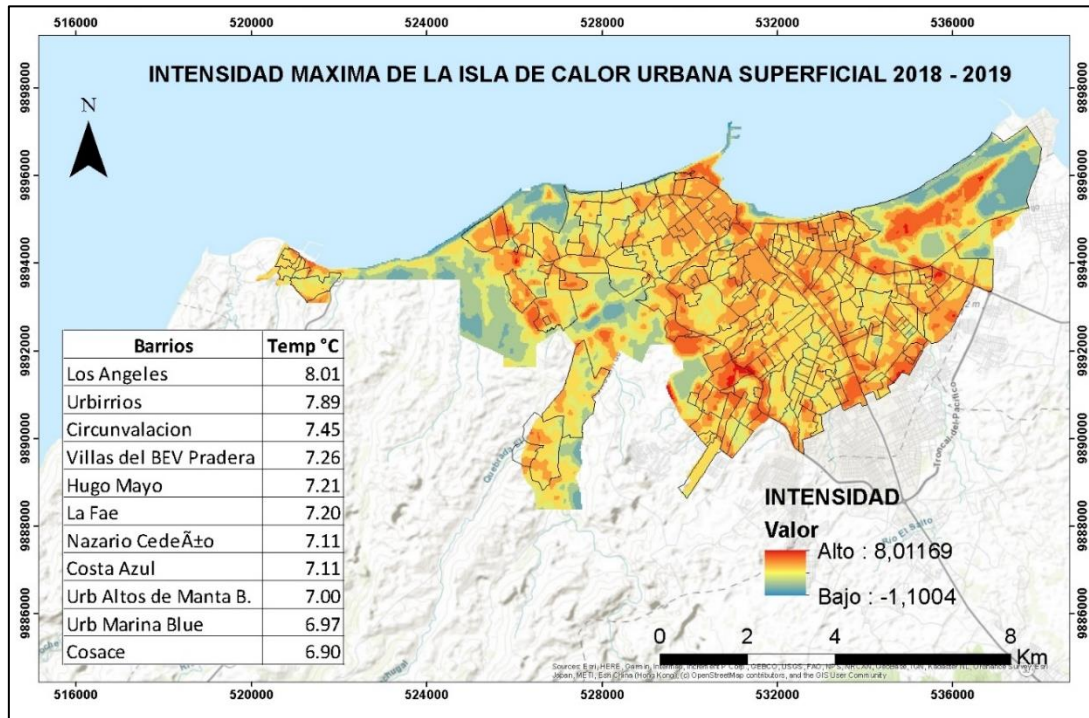
Durante el periodo 2016-2017 la isla de calor superficial diurna registró una intensidad de máxima de 7.92 °C, ubicándose en la categoría “muy fuerte”. Sin embargo, se observa una gran extensión de la superficie con predominio de temperaturas débiles que oscilan entre los 2°C y 3°C, seguidas por intensidades moderadamente débiles con temperaturas entre 3°C y 4°C e intensidades muy débiles de 0°C a 2°C. Las zonas más cálidas se extienden desde el centro de la zona urbana hacia el sur hacia el sur, al igual que las zonas con intensidades moderadas y moderadamente débiles que se extienden por el sur hasta el centro de la zona urbana hasta concertar en el norte con zonas de intensidades débiles y muy débiles que se concentran principalmente en el perfil costero. En este periodo los sectores más cálidos (con temperaturas superiores a los 6 °C) corresponden a los barrios: San Juan, California, COSACE, Urbirríos, Los Angeles, Nuevo Manta, los Geranios, la Fragata, los Senderos, el Porvenir, las Cumbres II y las Cumbres I (ver Figura 15).

Figura 15. Intensidad máxima de la isla de calor urbana superficial del Cantón Manta periodo 2016-2017



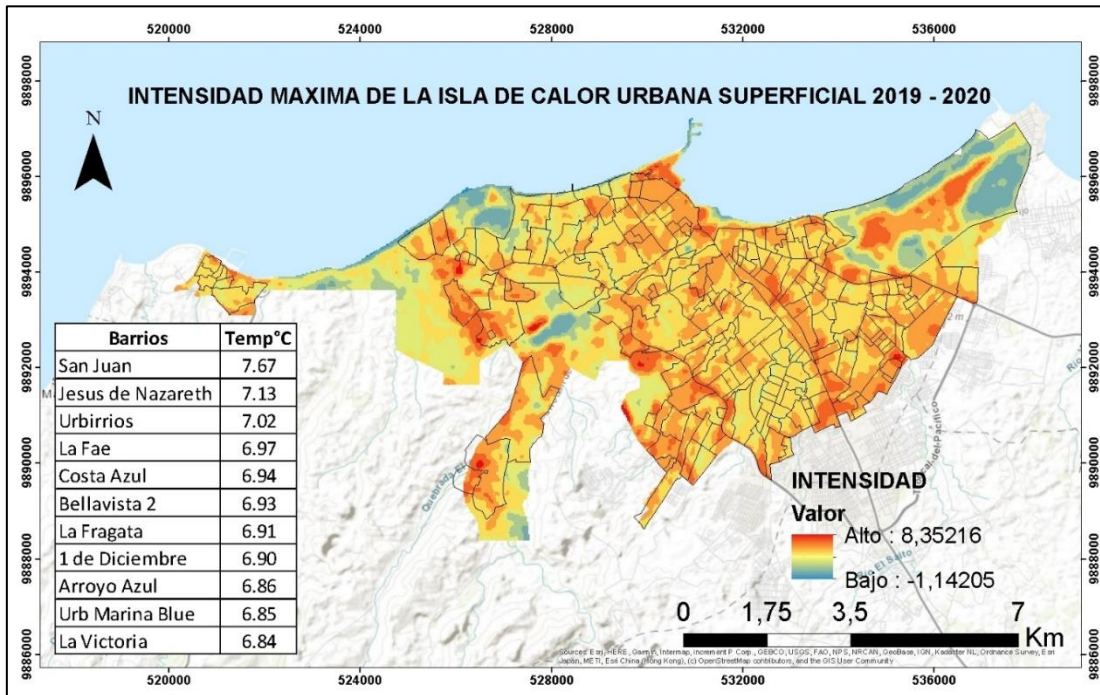
En el periodo comprendido entre el 2018-2019, la isla de calor urbana manifestó una intensidad máxima de 8.01°C considerada como “muy fuerte”, sin embargo se observa un notorio predominio de áreas con intensidades moderadas que oscilan entre los 4°C y 5°C, seguidas por áreas con intensidades moderadamente fuertes que oscilan entre los 5°C y 6°C. A diferencia del periodo 2015-2016 y 2016-2017, las zonas más cálidas se extienden por toda el área urbana, especialmente en el centro con una configuración poli-concéntrica, mientras que las zonas con intensidades moderadamente débiles y muy débiles tienden a concentrarse en la periferia del área urbana con proximidad hacia el perfil costero. Durante este periodo los sectores más cálidos (con temperaturas superiores a los 6°C) fueron los barrios: los ángeles, urbirrios, circunvalación, Villas del BEV pradera, Hugo Mayo, La FAE, Nazario Cedeño, Costa Azul, Urb Altos de Manta Beach, Urb Marina Blue y COSACE (ver Figura 16).

Figura 16. Intensidad máxima de la isla de calor urbana superficial del Cantón Manta periodo 2018-2019



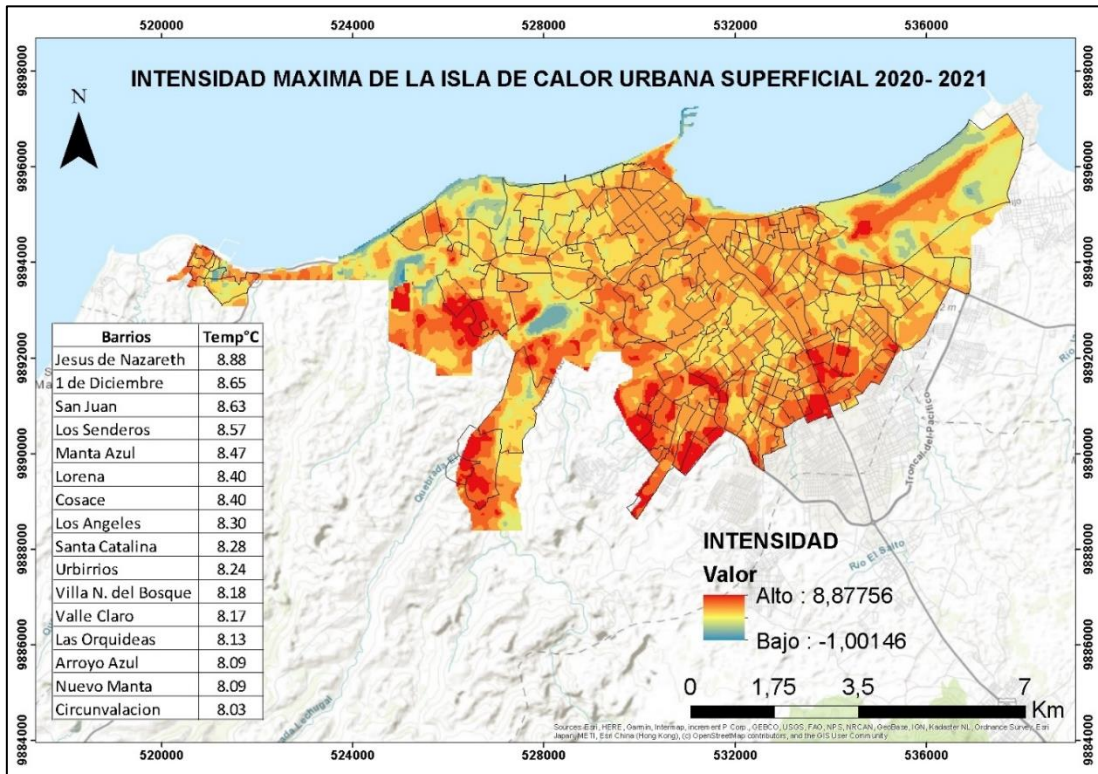
Para el periodo 2019-2020, la isla de calor alcanzó una intensidad máxima de 8.35°C, situándose en la categoría de “muy fuerte”, sin embargo, predominan áreas con intensidades moderadas, cuya temperatura oscila entre los 4°C y 5°C, seguidas por intensidades moderadamente fuertes de 5°C a 6°C. A diferencia de periodos anteriores se distingue un aumento de la cobertura de zonas con intensidades mayores a los 7°C. Las zonas más cálidas se distribuyen por toda el área urbana concentrándose en las áreas adyacentes a las principales vías del Cantón como la Ave. 4 de noviembre, la avenida del malecón, la vía puerto-aeropuerto, la vía circunvalación, avenida 113 y la vía Manta-Rocafuerte; mientras que las zonas con intensidades moderadamente débiles y muy débiles se ubican sobre las áreas del bosque seco adyacente al aeropuerto Eloy Alfaro, la ruta a San Juan de Manta y las zonas de vegetación seca adyacentes a la Terminal de Combustibles Barbasquillo de Petro-Ecuador ubicada al noreste del Cantón. En este periodo los sectores más cálidos (con temperaturas superiores a los 6°C) fueron los barrios: San Juan, Jesús de Nazareth, Urbirrios, la FAE, Costa azul, Bellavista II, la Fragata, 1 de diciembre, Arroyo Azul, urb. Marina Blue, la Victoria, Manta azul y Colinas del Jocay (ver Figura 17).

Figura 17. Intensidad máxima de la isla de calor urbana superficial del Cantón Manta periodo 2019-2020



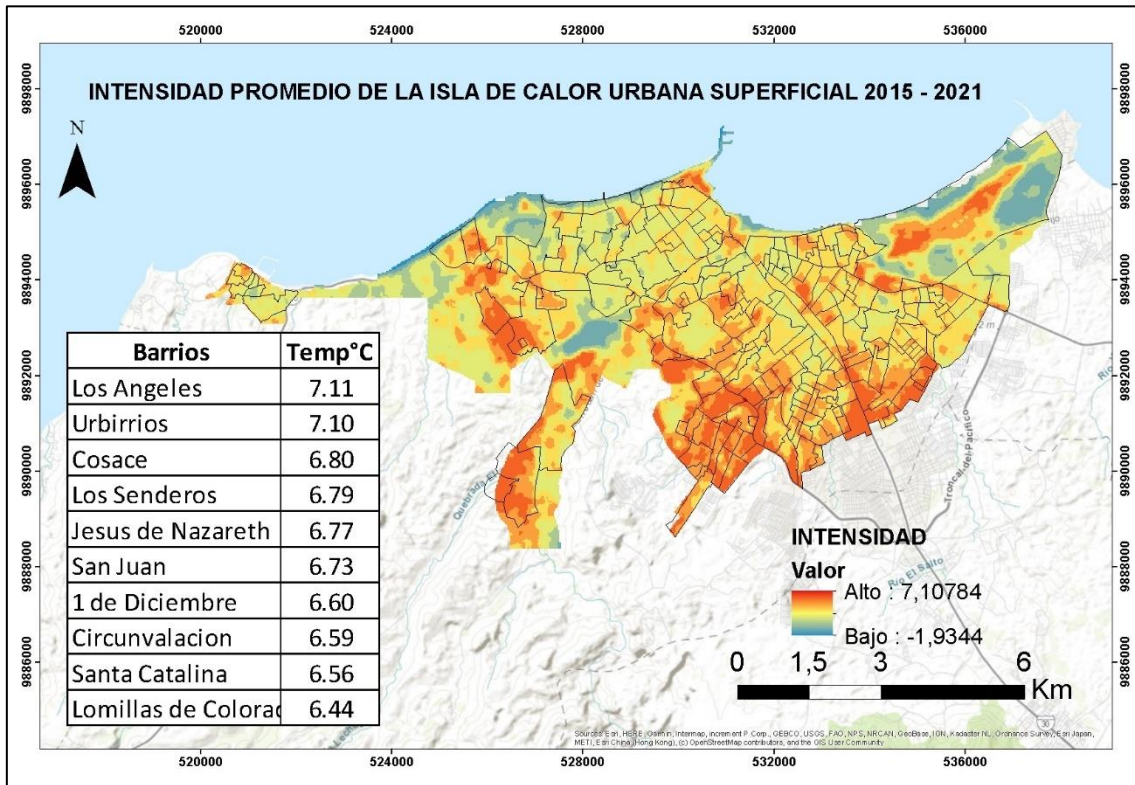
Por otro lado, la mayor intensidad en los periodos evaluados se registró durante el 2020-2021, alcanzando una intensidad máxima de 8.88 °C, considerada como “muy fuerte”. En este periodo se observa el predominio de zonas con intensidades moderadamente fuertes cuya temperatura oscila entre los 5°C y 6°C, seguidas por áreas con intensidades fuertes que oscilan entre los 6°C y 7°C; mientras que se verifica una menor predominancia de zonas con intensidades débiles como resultado del incremento progresivo del calor en el área urbana. Las zonas más cálidas abarcan una considerable superficie del área urbana extendiéndose desde el interior hacia la periferia; mientras que, las zonas con intensidades débiles han disminuido y se presentan específicamente sobre las áreas de vegetación seca adyacentes al Aeropuerto Eloy Alfaro y a las quebradas estacionales de barbasquillo y la ciudadela universitaria. Por otro lado, las temperaturas consideradas “muy débiles” se ubican sobre al perfil costero. En este periodo los sectores más cálidos (por encima de los 7°C) corresponden a los barrios: Jesús de Nazareth, 1 de diciembre, San Juan, Los Senderos, Manta Azul, la Lorena, COSACE, Los Angeles, Santa Catalina, Urbirríos, Villanueva del bosque, Valle claro, las Orquídeas, Arroyo Azul, Nuevo Manta y Circunvalación. (ver Figura 18).

Figura 18. Intensidad máxima de la Isla de calor urbana superficial del Cantón Manta periodo 2020-2021..



Posteriormente, se calculó la isla de calor urbana de superficie promedio entre los seis periodos evaluados. Su temperatura promedio alcanzó una intensidad máxima de 7.107°C ubicándose en la categoría de “muy fuerte” de acuerdo a la clasificación de intensidades de islas de calor urbana superficiales. Se pudo evidenciar que las zonas más cálidas se distribuyen por toda la superficie del Cantón, exceptuando las zonas de bosque tropical seco adyacente a las instalaciones de la FAE, las áreas de la Terminal de combustibles Barbasquillo y toda la franja costera. En cuanto a la concreción de la isla de calor en los barrios del Cantón, los sectores más cálidos (con temperaturas superiores a los 6°C) corresponden a: Valle Claro, COSACE, 1 de diciembre, la Fragata, Manta Azul, los Angeles, Urbirriós, Villas del BVE (ver Figura 19).

Figura 19. Intensidad máxima de la isla de calor urbana superficial del Cantón manta promedio 2015-2021



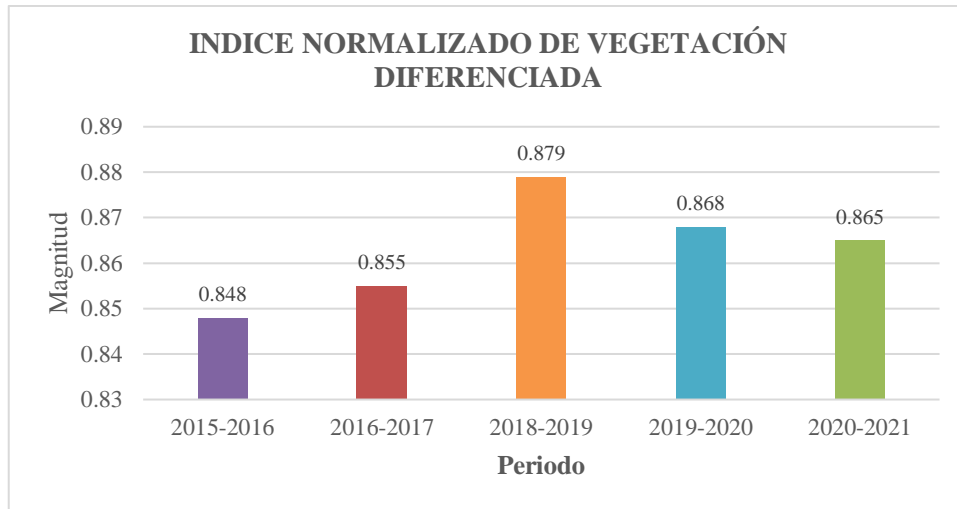
8.3. Distribución de las variables geográficas de la isla de calor de superficie

Frente a la variedad de las temperaturas evidenciadas, se evaluaron algunas variables geográficas asociadas a la formación de las islas de calor urbano de superficie de acuerdo a los criterios propuestos por Sarricolea & Romero (2010), correspondientes a la cobertura vegetal, la exposición a laderas, la distancia al mar, la altitud y la densidad poblacional. Es importante precisar que estas variables por sí solas no son capaces de explicar la distribución de las islas de calor urbanas de superficie, por lo cual deben ser consideradas en su conjunto.

Mediante la aplicación del índice normalizado de vegetación diferenciada (NDVI) se obtuvo la caracterización de la cobertura vegetal del Cantón para cada uno de los periodos evaluados, con excepción del periodo 2017-2018 puesto que manifestó índices de nubosidad muy elevados que imposibilitaron el procesamiento de su imagen satelital. Posteriormente se realizó una reclasificación de los valores resultantes empleando la herramienta “Reclassify” del software de “ArcMap”, generando cinco rangos de NDVI de acuerdo a la Tabla 5. Con base en las magnitudes registradas los valores fueron

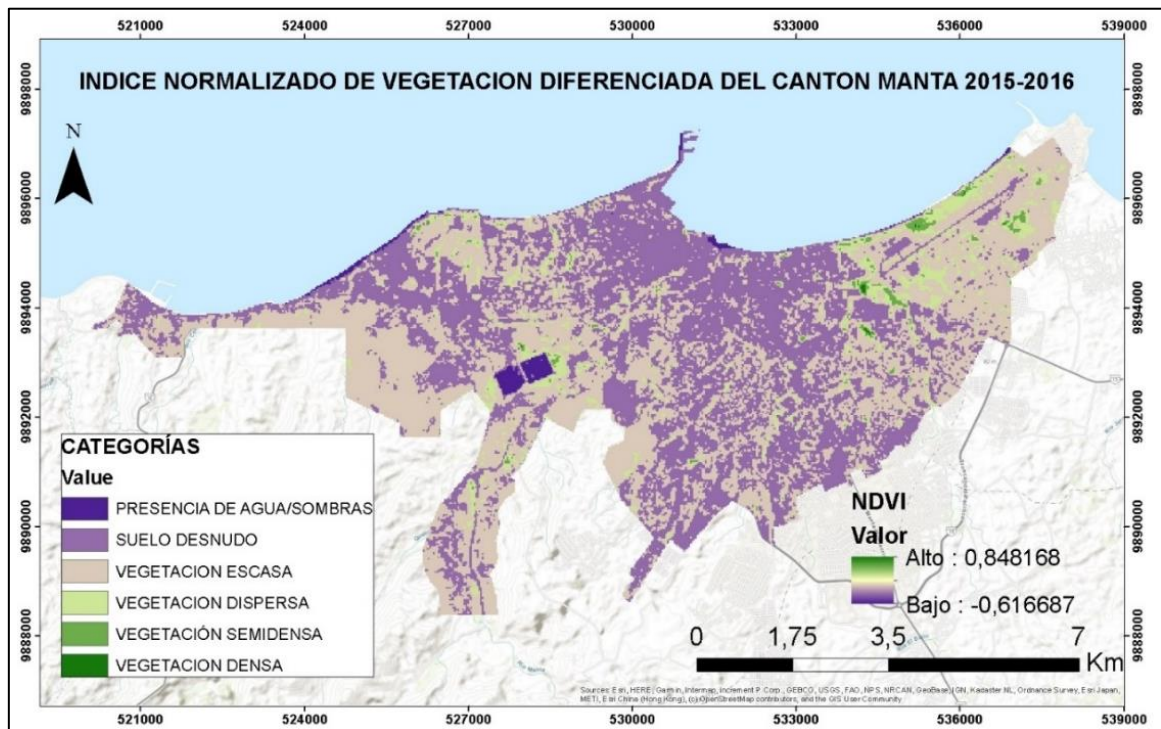
ordenados para conocer el índice de vegetación en cada uno de los periodos evaluados (ver Gráfico 5).

Gráfico 5. Resultados del cálculo del NDVI para los periodos evaluados



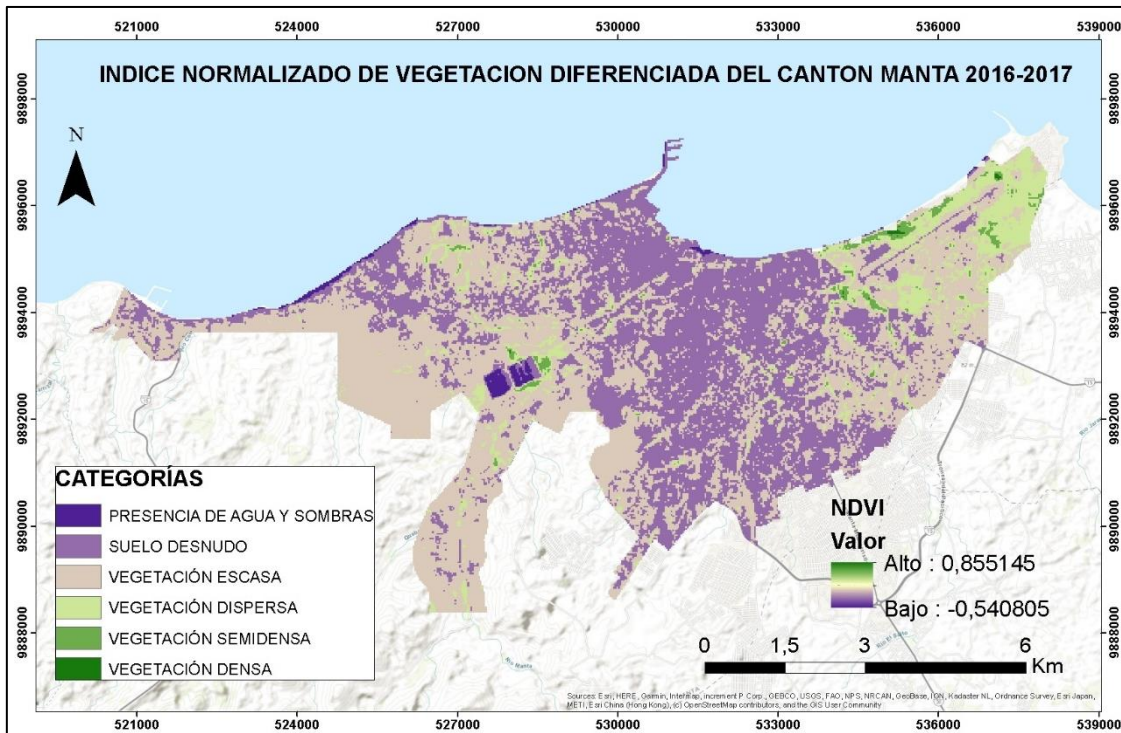
A partir de los resultados obtenidos se constató que el periodo 2015-2016 presenta el índice de vegetación más bajo con un NDVI de 0.84 (resultado adimensional) evidenciando una alta concentración de suelo con escasa vegetación y suelo desnudo, seguido por zonas con vegetación muy dispersa. Por otro lado, la vegetación semi densa se ubica en forma de parches en las áreas adyacentes al Aeropuerto Eloy Alfaro, los alrededores de las lagunas de oxidación y las quebradas estacionales de sectores como la avenida universitaria y la avenida Barbasquillo, mientras que las zonas con vegetación densa son muy exiguas y se pueden observar pequeños bloques localizados puntualmente en la zona de amortiguamiento del Aeropuerto del Cantón y el bosque de tipo matorral y arbustivo en el sector el Palmar (ver Figura 20).

Figura 20. Índice normalizado de vegetación diferenciada del Cantón Manta periodo 2015-2016



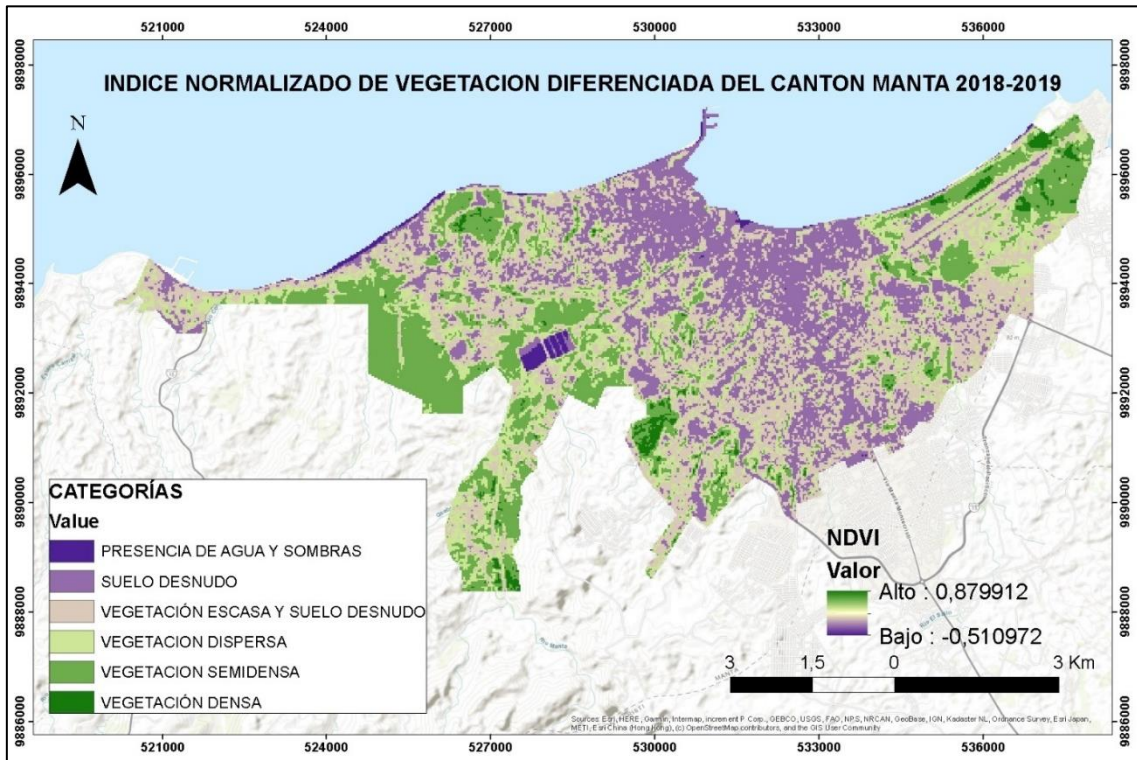
En el periodo 2016-2017 el análisis por reflectancia determinó un índice de vegetación más alto que el periodo anterior (0.855) con una mayor concentración de zonas con vegetación escasa y suelo desnudo sin cobertura vegetal (ver Figura 21). Por otro lado, se manifestó un aumento de la vegetación dispersa, la vegetación densa y semidensa, esta última distribuida en los alrededores de las algunas de oxidación, las áreas adyacentes al Aeropuerto Eloy Alfaro y las quebradas de la avenida Barbasquillo y Universitaria.

Figura 21. Índice normalizado de vegetación diferenciada del Cantón Manta periodo 2016-2017..



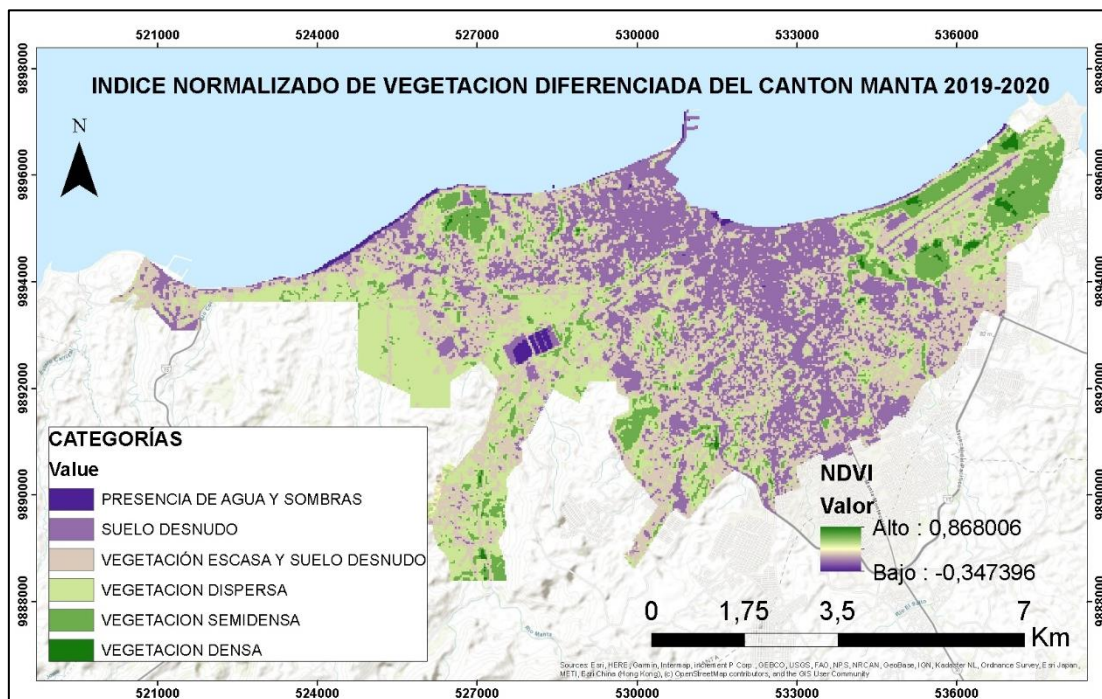
Durante el periodo 2018-2019 se constató el índice de vegetación más elevado de todos los periodos evaluados, con un valor aproximado de 0.879. Principalmente se observa un aumento importante de la cobertura vegetal semidensa en comparación con los periodos anteriores, sin embargo, aún se observa predominancia de zonas con escasa vegetación seguidas por zonas con suelo desnudo. Las áreas de mayor cobertura de vegetación se extienden por el suroeste hacia las zonas periurbanas, así como en algunas quebradas estacionales del sector Barbasquillo, avenida universitaria, los alrededores de las lagunas de oxidación del Cantón y las zonas de amortiguación adyacentes a los predios del Aeropuerto Eloy Alfaro. Mientras que en el centro del Cantón se visualizan áreas con menor cobertura vegetal y densas infraestructuras urbanas (ver Figura 22).

Figura 22.. Índice normalizado de vegetación diferenciada del Cantón Manta periodo 2018-2019..



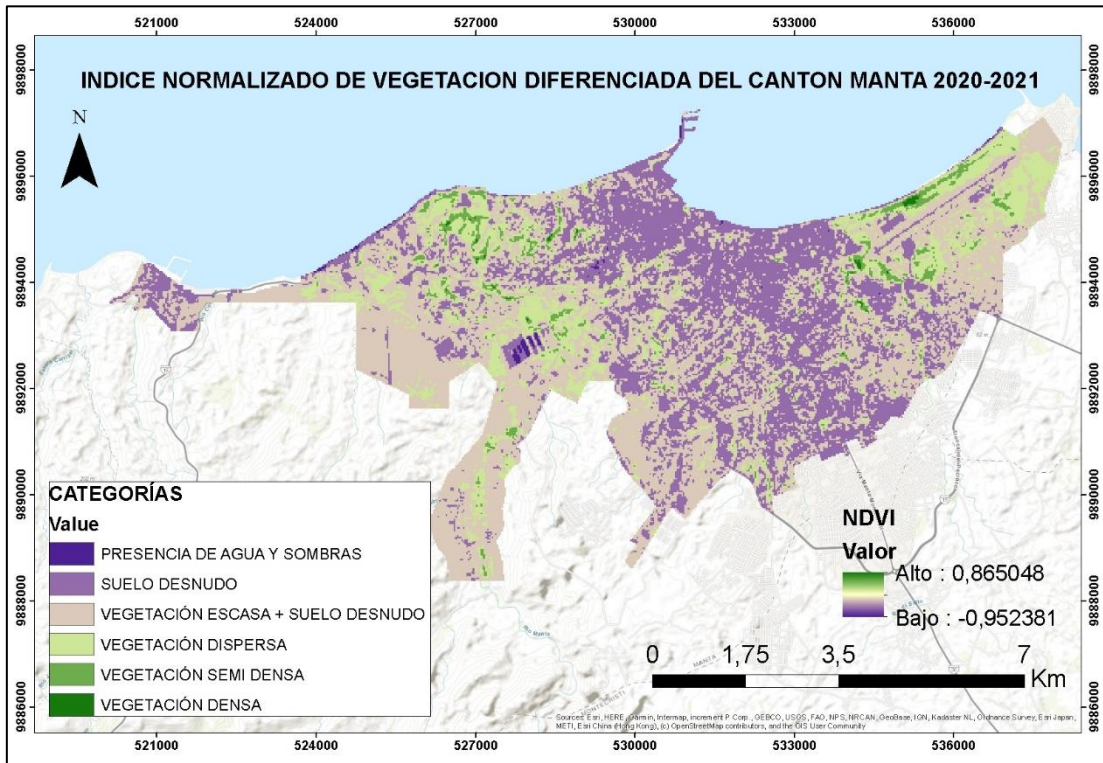
En el periodo 2019-2020 se constató un NDVI de 0.868 aproximadamente, ubicándose como el segundo periodo con mayor índice de vegetación (ver Figura 23). Se destaca la disminución de las zonas con vegetación semidensa, mientras que las áreas con vegetación escasa y suelo desnudo se mantiene predominantes, no obstante, se observa un incremento de zonas con vegetación dispersa de tipo matorral tropical distribuidas por toda la superficie del área urbana del Cantón, especialmente en mayor concentración hacia el suroeste, en las áreas próximas a la zona periurbana. Mientras que, la vegetación densa semidensa mantiene su concentración en las zonas de amortiguamiento del aeropuerto Eloy Alfaro, las quebradas estacionales de “Barbasquillo” y la avenida universitaria.

Figura 23. Índice normalizado de vegetación diferenciada del Cantón Manta periodo 2019-2020.



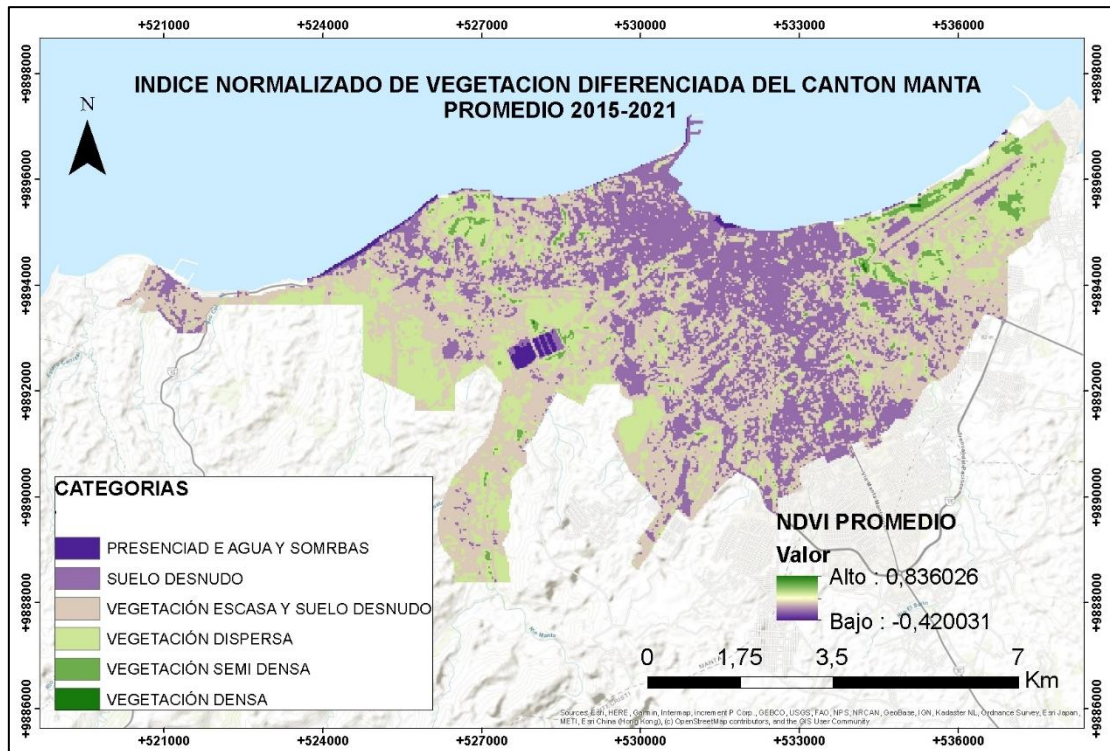
Para el periodo 2020-2021 se registró un NDVI máximo de 0.865 ubicándose como el tercer periodo con el NDVI más alto. Se destaca un importante incremento de zonas con vegetación escasa y suelo desnudo. Por otro lado, en relación con el periodo anterior, se reduce la vegetación densa y semidensa. Las zonas con vegetación dispersa se ubican en el noreste de la zona urbana adyacentes al aeropuerto Eloy Alfaro; hacia el noroeste en las quebradas del sector “Barbasquillo” y la avenida universitaria; y hacia el sur. Por otro lado, la vegetación semidensa posee una concentración mayor hacia el noroeste de la zona urbana en algunas quebradas estacionales y planicies contiguas sobre colinas litorales bajas. Mientras que la vegetación densa se localiza puntualmente en el bosque tropical seco del aeropuerto (ver Figura 24).

Figura 24. Índice normalizado de vegetación diferenciada del Cantón Manta periodo 2019-2020..



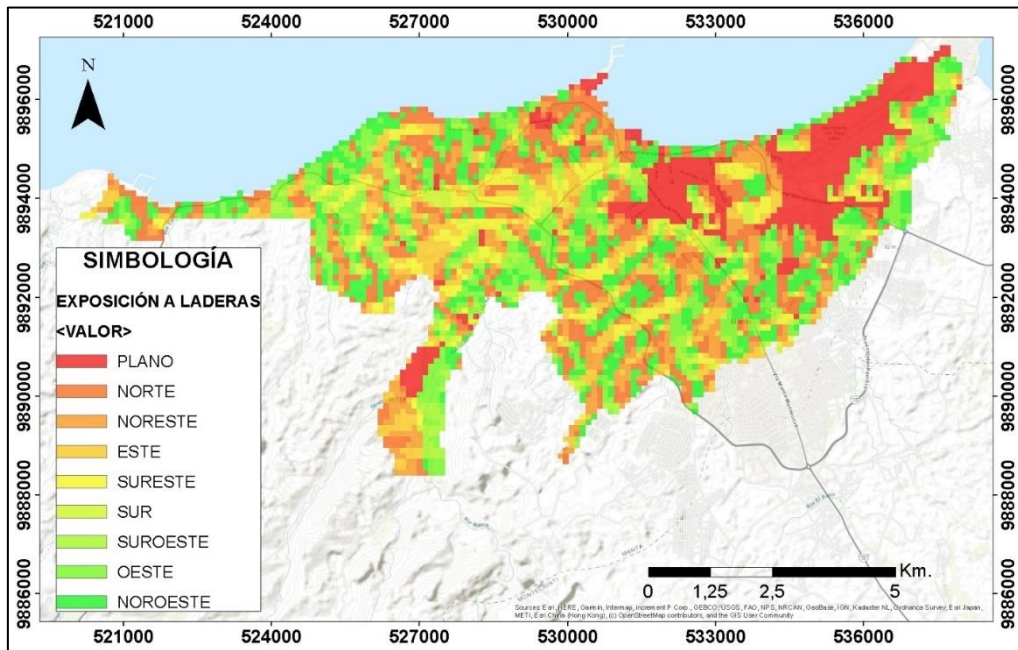
Uteriormente, se calculó NDVI promedio para los periodos propuestos, alcanzando un valor máximo de 0.83 y un valor mínimo de -0.420. En términos generales se observa una predominancia de áreas con cobertura vegetal escasa y suelo desnudo, mientras que las áreas con cobertura vegetal se caracterizan por poseer mayormente vegetación dispersa concentrada hacia el noreste, noroeste y suroeste del área urbana del Cantón. Por otro lado, las zonas de concentración de vegetación semi densa se localizan hacia el noreste de la zona urbana del Cantón, en la zona de amortiguación del aeropuerto Eloy Alfaro, en las quebradas estaciones de los sectores Barbasquillo y avenida universitaria, mientras que las zonas con vegetación densa son relativamente escasas en comparación con otro tipo de coberturas de suelo y se concentran puntualmente en las áreas adyacentes al aeropuerto Eloy Alfaro (ver Figura 25).

Figura 25. Índice normalizado de vegetación diferenciada del Cantón Manta promedio 2015-2021



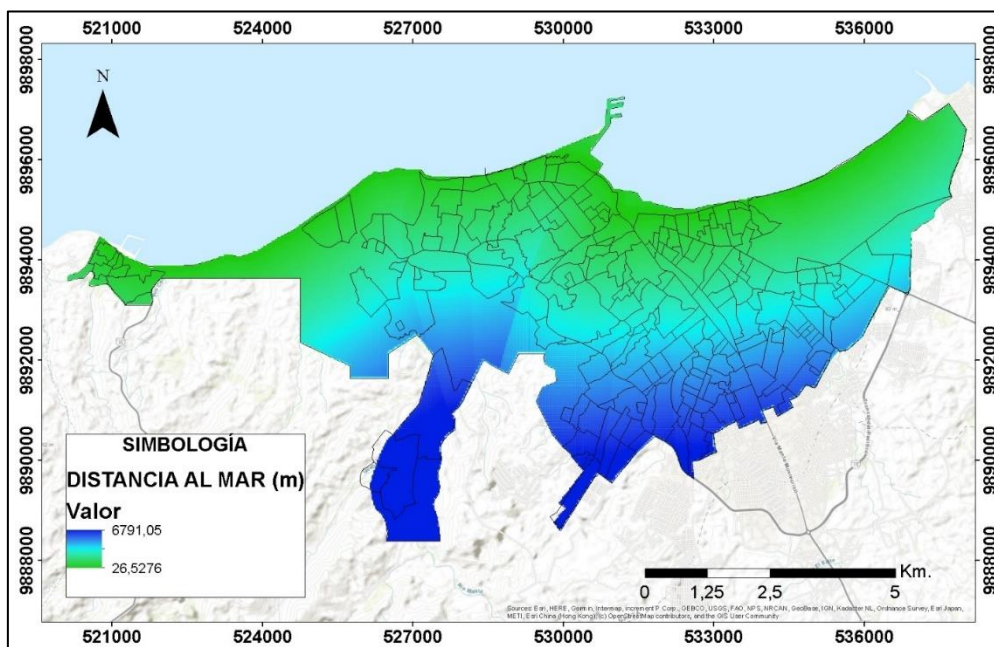
Además del NDVI se calcularon otros factores o variables geográficas que influyen en la configuración de la isla de calor superficial diurna. Respecto a la exposición a laderas, esta variable condiciona las características ambientales del sitio, como la temperatura y la humedad, afectando los patrones de crecimiento de las distintas especies vegetales, así como las interacciones entre las mismas. Se identificaron todas las combinaciones posibles de exposición de ladera para el área de estudio (plano, norte, noreste, este, sureste, sur, suroeste, oeste, y noroeste). Las laderas este y oeste reciben la mayor parte de la insolación durante el año, mientras que las laderas norte y sur reciben niveles de radiación muy similares a lo largo del año (ver Figura 26).

Figura 26. Distribución de variables geográficas explicativas – exposición a laderas



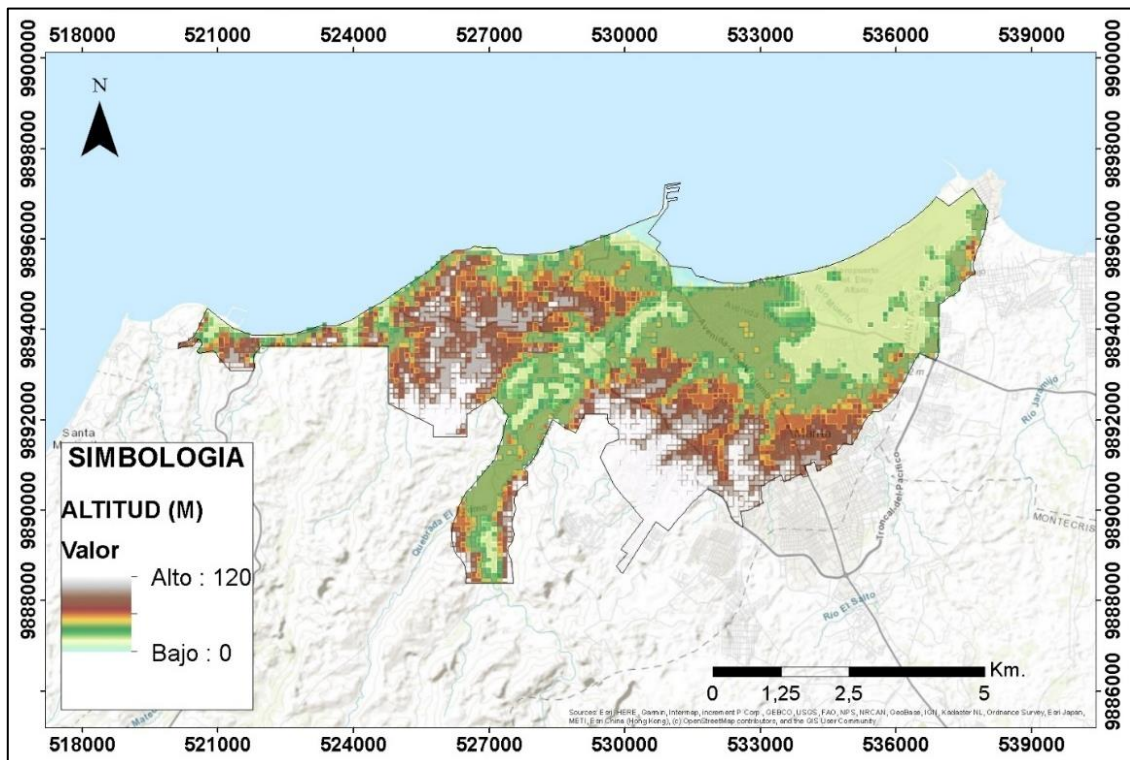
En cuanto a la distancia al perfil costero, los barrios ubicados en la zona norte y centro norte se encuentran más cercanos al mar, mientras que los sectores del centro sur se mantienen más alejados, manteniendo una distancia máxima de 6791.05 m. A su vez, las quebradas del Cantón no mantienen caudal ya que son de régimen estacionario y marcadamente intermitentes, por lo que no se consideran un factor predominante para la configuración de la isla de calor superficial diurna (ver Figura 27).

Figura 27. Distribución de variables geográficas explicativas – distancia al mar



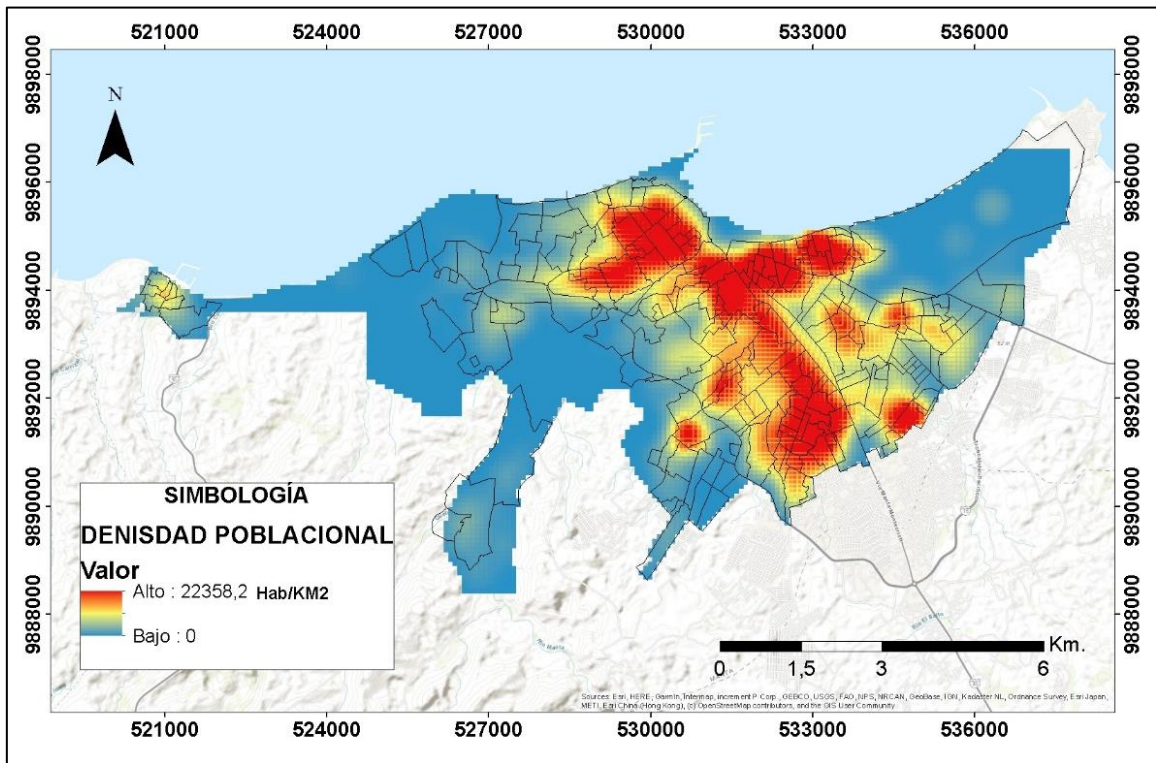
Las diferencias altimétricas de la zona urbana alcanzan los 120 m.s.n.m. las pendientes predominantes corresponden a terrenos suavemente colinados o en pendientes inclinadas ubicadas al sur y al oeste contiguas a la zona periurbana. Estos accidentes de relieve son capaces de bloquear la circulación de los vientos de superficie, lo que a su vez influye sobre la radiación solar. Por otro parte las zonas más planas se ubican al centro norte y por todo el perfil costero con alturas que van desde 0 hasta los 30 m.s.n.m. (ver Figura 28).

Figura 28. Distribución de variables geográficas explicativas – altitud



Finalmente, las densidades de población se observaron varios núcleos de concentración demográfica. Las zonas densamente pobladas se ubican en la zona centro, norte y sureste del Cantón alcanzando los 22,358 Hab/Km² aminorándose a medida que se acerca a la zona periurbana y zona rural (ver Figura 29).

Figura 29. Distribución de variables geográficas explicativas – densidad poblacional.



8.4. Coeficiente de correlación y regresión lineal

La relación estadística entre la intensidad de la isla de calor superficial diurna en cada uno de los barrios del Cantón y las demás variables geográficas se muestran en la tabla 8, mientras que la tabla 9 muestra el resultado del análisis de regresión lineal múltiple. Es importante destacar que la correlación más alta de la vegetación se da en el periodo 2018-2019, mientras que para el resto de variables la correlación más alta se alcanza entre el 2015-2016

Tabla 8. Resultados coeficientes de correlación de Pearson de las variables geográficas.

| Variables | Periodo | | | | | Promedio 2015- 2021 |
|----------------------|---------------|-----------|---------------|-----------|-----------|---------------------------|
| | 2015-2016 | 2016-2017 | 2018-2019 | 2019-2020 | 2020-2021 | |
| NDVI | 0.118 | -0.067 | -0.402 | -0.130 | -0.234 | 0.061 |
| Distancia al mar | 0.719 | 0.718 | -0.024 | 0.161 | 0.538 | 0.693 |
| Exposición a laderas | 0.252 | 0.147 | -0.073 | -0.064 | 0.045 | 0.133 |
| Densidad poblacional | -0.462 | -0.228 | 0.035 | -0.208 | -0.143 | -0.310 |
| Altitud | 0.545 | 0.551 | 0.006 | 0.078 | 0.478 | 0.541 |

Tabla 9. Análisis de regresión lineal múltiple entra la isla de calor urbana y las variables geográficas entre los periodos estudiados

| Periodo | R múltiple | R ² Ajustado | R2 múltiple ajustado | Error típico | Estadístico T | p-value |
|--------------------|------------|-------------------------|----------------------|--------------|---------------|---------|
| 2015-2016 | 0.808 | 0.653 | 0.645 | ±0.546 | 80.603 | 0.0000 |
| 2016-2017 | 0.779 | 0.607 | 0.598 | ±0.807 | 66.194 | 0.0000 |
| 2018-2019 | 0.543 | 0.295 | 0.278 | ±0.444 | 17.888 | 0.0000 |
| 2019-2020 | 0.518 | 0.269 | 0.251 | ±0.399 | 15.713 | 0.0000 |
| 2020-2021 | 0.723 | 0.523 | 0.512 | ±0.451 | 46.965 | 0.0000 |
| Promedio 2015-2021 | 0.805 | 0.647 | 0.639 | ±0.344 | 78.563 | 0.0000 |

En el periodo 2015-2016 se ha constatado que la variable con más peso corresponde a la distancia al mar con una correlación de 0.719 seguido por la altitud con 0.545, mientras que las variables la densidad poblacional, la exposición a laderas y el NDVI poseen una relación de -0.46, 0,252 y 0.112 respectivamente, constituyéndose el NDVI como la variable con la correlación más baja. Las variables en su conjunto explican aproximadamente el 64.5% (R² ajustado) del fenómeno de la isla de calor urbana de superficie, considerándose como el coeficiente más alto de todos los periodos evaluados.

Para el periodo 2016-2017 la variable que más permite explicar el fenómeno corresponde a la distancia al mar, al igual que en el periodo 2015-2016, con una relación de 0.718 seguido por la altitud con 0.551, mientras que las variables densidad poblacional, la exposición a laderas y el NDVI comprenden el 0.228, 0.147 y 0.67 respectivamente, constituyéndose el NDVI aún como la variable con la correlación más baja. Estas variables permiten explicar aproximadamente el 59.8% del fenómeno (R² ajustado).

En el periodo 2018-2019 la tendencia percibida en los años anteriores cambia significativamente, en donde el NDV se constituye como la variable con la correlación más alta (0,402) seguida por la exposición a laderas con una relación de 0.73, mientras que las variables densidad poblacional, distancia al mar y altitud mantienen una relación de 0.35, 0.24 y 0.006 respectivamente, considerando a la altitud como la variable más

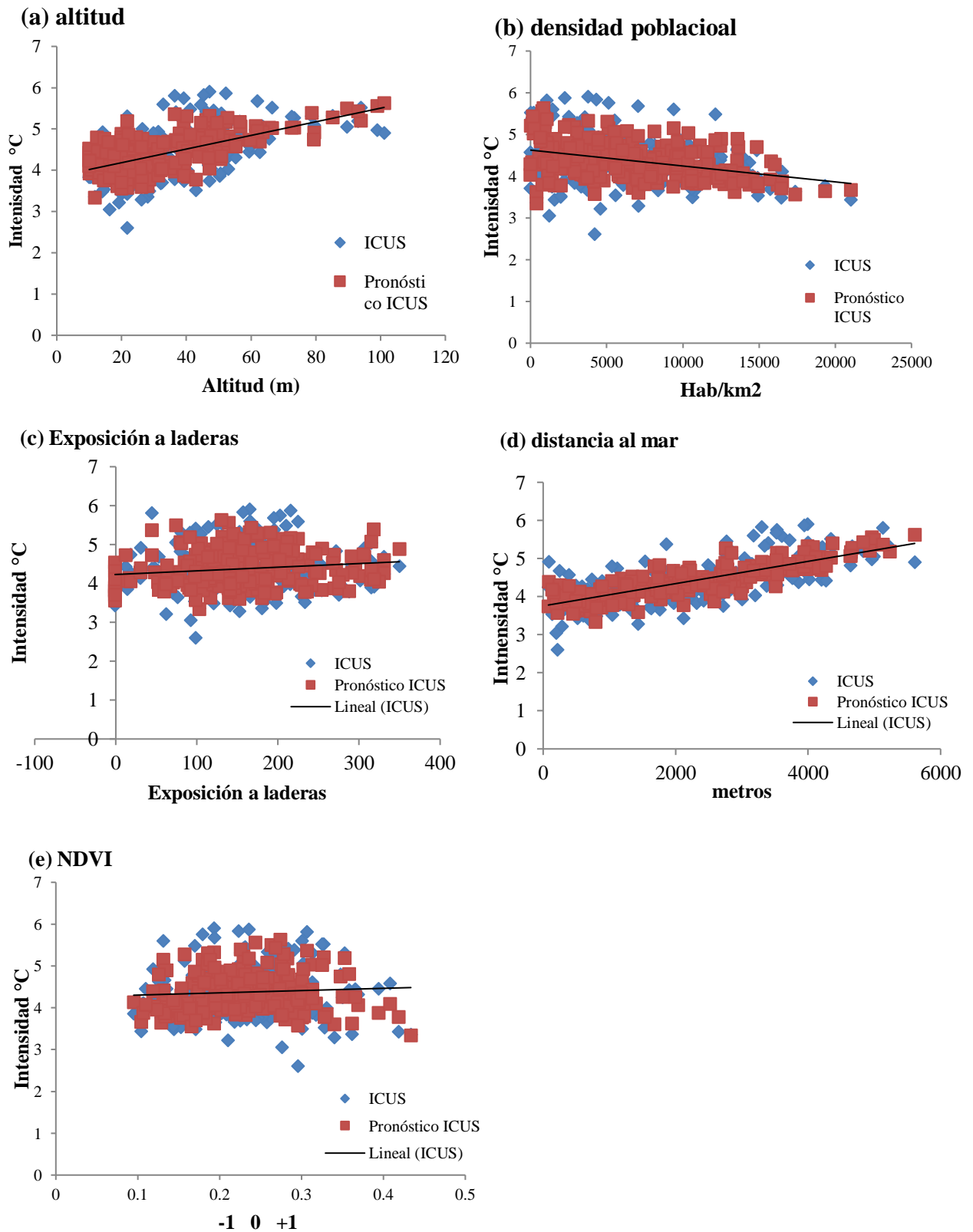
baja. La relación de estas variables en su conjunto representa aproximadamente el 27.8% del fenómeno (R^2 ajustado).

Durante el periodo 2019-2020 la variable que mejor permitió explicar el fenómeno corresponde a la densidad poblacional con una relación del 0.208 seguido por la distancia al mar con una relación del 0.161, mientras que las variables NDVI, altitud y exposición a laderas poseen una relación del 0.13, 0.78 y 0.64 respectivamente, constituyéndose la variable exposición a laderas como la variable con la relación más baja. A su vez, le relación de las variables en su conjunto permiten explicar el 25.1% (R^2 ajustado) del fenómeno de la isla urbana de calor superficial diurna, constituyéndose a su vez como el periodo con el coeficiente de relación más bajo de los periodos estudiados.

Para el periodo 2020-2021 la variable con mayor peso corresponde a la distancia al mar con una relación del 0.538 seguida por la altitud con una relación cercana al 0.478, mientras que las variables altitud, NDVI y exposición a laderas mantienen una relación de 0.478, 0.234 y 0.45 respectivamente, constituyéndose la exposición a laderas como la variable con la relación más baja en este periodo. Por otro lado, las variables en su conjunto permiten explicar el 51.2% (R^2 ajustado) del fenómeno en estudio.

Para ampliar la visión de la relación entre el fenómeno y las variables geográficas se calculó un coeficiente de correlación general en base al promedio de años 2015-2021, constatándose que la variable que mejor permite explicar el fenómeno comprende la distancia al mar con una correlación de 0.693 seguida de la altitud con una relación de 0.541, mientras que las variables densidad población, exposición a laderas y NDVI comprenden una relación del 0.31, 0.133 y 0.61 respectivamente, en donde la variable geográfica del NDVI se constituye como la variable con la relación más baja de los periodos evaluados en el presente estudio. Por otro lado, las variables geográficas para promedio de años 2015-2021 permiten explicar el 63.9% (R^2 ajustado) del fenómeno abordado. La curva de regresión se presenta en el gráfico 6.

Gráfico 6. Curva de regresión ajustada para el conjunto de variables geográficas durante el promedio de años 2015-2021 (a) altitud; (b) densidad poblacional; (c) exposición de laderas; (d) distancia al mar; (e) NDVI



En la tabla 10 se muestran los coeficientes y constantes del modelo de regresión múltiple, donde se indican los signos de relación entre las variables geográficas de la distribución de la temperatura superficial para el periodo de los años propuestos.

Tabla 10. Coeficientes y constantes de la regresión lineal múltiple para los periodos evaluados

| Variables | Coeficiente 2015-2016 | Coeficiente 2016-2017 | Coeficiente 2018-2019 | Coeficiente 2019-2020 | Coeficiente 2020-2021 | Coeficiente Promedio 2015-2021 |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Constantes | 3.908 | 4.319 | 6.132 | 6.049 | 6.450 | 5.152 |
| NDVI (-1 a +1) | -5.514 | -9.163 | -3.924 | -3.591 | -6.065 | -4.666 |
| Distancia al mar (m) | +0.00050 | +0.001 | +0.00010 | +0.00016 | +0.00024 | +0.00034 |
| Exposición a laderas (0°-360°) | +0.00068 | -0.00027 | -0.000333 | -0.00069 | -0.00060 | -0.00027 |
| Densidad poblacional (hab/km2) | -0.000080 | -0.00007 | -0.000046 | -0.000055 | -0.00005 | -0.00006 |
| Altitud (m) | -0.004 | -0.006 | -0.001 | -0.004 | +0.005 | -0.00058 |

En el periodo 2015-2016 las relaciones positivas se asocian a la distancia al mar y la exposición a laderas. En este contexto, a medida que aumenta el valor de estas variables la intensidad de la isla de calor de superficie también aumentará. Mientras que, las relaciones negativas se presencian sobre la cobertura vegetales, la densidad poblacional y la altitud, por lo que a medida que el valor de estas aumente la temperatura va a disminuir. Al examinar los valores de la tabla 10 se determina que ninguna de las variables del modelo debería eliminarse puesto que su *p-value* fue inferior a 0.05 considerándose estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95% y generando la siguiente expresión:

$$ICUs_{2015-2016} = 3.908 - 5.514 \times NDVI + 0.00050 \times dist. \text{ Al mar} - 0.00068 \times expo. \text{ a laderas} - 0.000080 \times densidad \text{ poblacional} - 0.004 \times altitud.$$

Para el periodo 2016-2017 las relaciones positivas se presentan únicamente en la distancia al mar, mientras que las relaciones negativas se asocian a la cobertura vegetal,

la exposición a laderas, la densidad poblacional y la altitud, por lo que a medida que sus valores aumentan la intensidad de la isla de calor será menor. Por otro lado, no es necesario eliminar alguna de las variables del modelo ya que su *p-value* fue inferior a 0.05 considerándose estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95%, por lo que genera la siguiente expresión:

$$ICUs_{2016-2017} = 4.319 - 9.163 \times NDVI + 0.001 \times dist. \text{ Al mar} - 0.00027 \times expo. \text{ a laderas} - 0.00007 \times densidad \text{ poblacional} - 0.006 \times altitud$$

En el periodo 2018-2019 las relaciones positivas se presentan de nuevo solamente en la distancia al mar, por lo que mientras más lejano se encuentren los barrios a la línea costera la intensidad de la isla de calor será mayor. En cambio, las relaciones negativas se asocian entre las variables. Puesto que el valor de *p-value* fue menor a 0.05 no se debería eliminar ninguna de las variables del modelo ya que presenta una diferencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95% que genera la siguiente expresión.

$$ICUs_{2018-2019} = 6.132 - 3.924 \times NDVI + 0.00010 \times dist. \text{ Al mar} - 0.000333 \times expo. \text{ a laderas} - 0.000046 \times densidad \text{ poblacional} - 0.001 \times altitud.$$

En cuanto al periodo 2019-2020 las relaciones positivas continúan sobre la distancia al mar, por lo que a mayor distancia mayo será la intensidad de la isla de calor. Mientras que las relaciones negativas se manifiestan en las demás variables. A su vez, dado que el *p-value* en este periodo fue inferior a 0.05 no es necesario eliminar ninguna de las variables del modelo que genera la siguiente expresión:

$$ICUs_{2019-2020} = 6.049 - 3.591 \times NDVI + 0.00016 \times dist. \text{ Al mar} - 0.00069 \times expo. \text{ a laderas} - 0.000055 \times densidad \text{ poblacional} - 0.004 \times altitud.$$

En el periodo 2020-2021 las relaciones positivas se asocian a la altitud y a la distancia al mar, por lo que a medida que la elevación del terreno y la distancia con referencia a la

costa aumente mayor será la intensidad del fenómeno. En cambio, las relaciones negativas se asocian a la exposición a laderas, la densidad poblacional y la cobertura vegetal. Al examinar la tabla 9 se muestra que el *p-value* es inferior a 0.05 por lo que no es necesario simplificar el modelo ya que presenta una diferencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95% que genera la siguiente expresión:

$$ICUs_{2020-2021} = 6.450 - 6.065 \times NDVI + 0.00024 \times \text{dist. Al mar} - 0.00060 \times \text{expo. a laderas} \\ - 0.00005 \times \text{densidad poblacional} + 0.005 \times \text{altitud}.$$

Ulteriormente, se calculó la relación estadística para el promedio de años 2015-2021, por lo que en términos generales se constató una relación positiva únicamente sobre la distancia al mar. En cambio, las relaciones negativas se asocian a la cobertura vegetal, la exposición a laderas y la densidad poblacional. Por otro lado, no es necesario eliminar ninguna de las variables del modelo ya que al examinar la tabla 9 se muestra que el *p-value* es inferior 0.05 por lo que se considera estadísticamente significativo y genera la siguiente expresión:

$$ICUs_{2015-2021} = 5.152 - 4.666 \times NDVI + 0.00034 \times \text{dist. Al mar} - 0.00027 \times \text{expo. a laderas} \\ - 0.00006 \times \text{densidad poblacional} - 0.0058 \times \text{altitud}.$$

En cuanto a la sensibilidad de las ecuaciones a los cambios de las variables independientes, en la tabla 11 se aprecia la reacción de la intensidad de la isla de calor urbana superficial ante la variación de las variables geográficas.

Tabla 11. Sensibilidad de la intensidad de la isla de calor de superficie ante los cambios de valor en las variables geográficas

| Variab les | 2015- 2016 | 2016- 2017 | 2018- 2019 | 2019- 2020 | 2020- 2021 |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| NDVI (+0.5) | -2.76 | -4.58 | -1.98 | -1.80 | -3.03 |
| Distancia al mar (+1000 m) | +0.50 | +0.75 | +0.10 | +0.16 | +0.24 |
| Cambio de exposición oeste | +0.18 | -0.07 | -0.09 | -0.19 | -0.16 |
| Densidad poblacional (+2000 hab/km²) | -0.16 | -0.14 | -0.09 | -0.11 | -0.10 |
| Altitud (+50m) | -0.20 | -0.28 | -0.03 | -0.19 | 0.24 |

Al aumentar los valores el NDVI en 0.5 el valor más alto se asocia al periodo 2016-2017 con una disminución de 4.58 °C mientras que el valor más bajo se ocurre en el periodo 2019-2020 con una disminución de la intensidad de 1.80 °C. Por otro lado, al aumentar la distancia al mar 1000 metros el valor más alto se asocia al periodo 2016-2017 con un aumento de la intensidad de calor de 0.75 °C, en cambio la variación más baja ocurre en el año 2018-2019 con un aumento de la temperatura de 0.10 °C. A su vez, al cambiar la exposición de las laderas hacia el oeste los valores más altos se asocian al periodo 2015-2016 con un aumento de la intensidad de 0.18, en cambio el valor más bajo se presenta en el periodo 2019-2020 con una disminución de -0.19 °C. Mientras que, al aumentar la densidad poblacional en 2000 Hab/km² los valores más altos se presentan en el periodo 2015-2016 con una disminución de la intensidad de -0.16 °C, en cambio la variación más baja ocurre en el periodo 2018-2019 con una disminución de -0.09 °C. Finalmente, al aumentar la elevación topográfica 50 metros los valores más altos se presentan en el periodo 2016-2017 con una disminución de -0.28 °C, en cambio la variación más baja ocurre en el periodo 2018-2019 con una disminución de la intensidad de -0.03 °C.

9. DISCUSIÓN

La expansión de las ciudades en zonas geográficamente más amplias y su rápida urbanización ha desencadenado una serie de efectos multidimensionales que, si bien en algunos casos pasan desapercibidos, inciden de forma directa sobre los dinamismos socio ecológicos y en la calidad del hábitat de las áreas urbanas alrededor del mundo. Entre los principales efectos se destacan los cambios en los patrones espaciales que definen la climatología de extensas zonas pobladas y que pueden hacer que las temperaturas de las ciudades se eleven en ciertas áreas, simplemente debido a la forma en que se estructuran (Fuentes, 2015).

La presente investigación estudió la variabilidad de las temperaturas de la superficie de la zona urbana del Cantón Manta en relación con el área no urbana bajo el fenómeno conocido como isla de calor urbana superficial (ICUs), caracterizada por el aumento de temperatura de la ciudad en relación al medio rural inmediato. Para el análisis de los factores que permiten estudiar la variabilidad e intensidad de la temperatura superficial es necesario definir y estandarizar una serie de condiciones geográficas de las áreas a evaluar, con el fin de identificar las posibles zonas equiparables y que permitan diferenciar el efecto urbano.

Martin-Vide *et al.* (2015), afirman que la elección de la zona no urbana puede ser un problema ya que muchas ciudades carecen de límites claros y a menudo no limitan con lo rural sino con áreas periurbanas o rururbanas que de alguna manera están influenciadas la ciudad. Para atenuar este problema diferentes climatólogos han diseñado una clasificación de los paisajes urbanos y rurales, como Oke (2006) quien propuso la clasificación de zonas climáticas urbanas y que permitió comparar las intensidades de la isla de calor en 19 ciudades holandesas (Van Hove *et al.*, 2011) sin embargo, algunos autores como Siu & Hart (2013) sostienen que la elección de los puntos no urbano en estudios previos no ha sido representativa. Para evitar una sobrestimación y subestimación del efecto urbano la zona comparable (no urbana) debe situarse fuera del espacio urbano construido para que su calor antropogénico sea insignificante en el balance energético y para que el calor sensible y latente sea similar a la cobertura natural.

Eliasson (1994) afirma que los patrones de temperatura urbano-rural se encuentran influenciados por el uso de la tierra, la morfología del paisaje, la topografía y la distancia al mar. Por lo tanto, al calcular la diferencia térmica entre dos puntos y que ésta refleje el efecto de la ciudad es necesario que estos factores sean similares entre los puntos seleccionados. En este sentido, las variables geográficas consideradas para equiparar las zonas de medición en la presente investigación correspondieron a la altitud y la distancia al mar debido a su alto nivel de representatividad, al igual que la investigación de Williams (2019) en el análisis de la intensidad de las islas de calor de superficie en las principales conurbaciones de la v región de Valparaíso, y Martínez (2021) en el análisis de la evolución de las ICUs en las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén en la región del Biobio de Chile.

En relación a las elevaciones topográficas, Martín-Vide *et al.* (2015) sostienen que una diferencia de altitud de 30,8 m provocará una variación de 0,2 °C, teniendo en consideración el gradiente de temperatura vertical promedio (0,65 °C / 100) lo que representa un sesgo urbano en el cálculo de intensidades, por lo cual, siguiendo el esquema propuesto por Stewart & Oke (2009) para la selección de dos puntos urbano-no urbano, establecen como regla general que el punto no urbano no debe diferir del urbano en más \pm 30 m. Para el caso de la presente investigación, a pesar que se registraron diferentes alturas para cada periodo evaluado, éstas se encontraron dentro del límite establecido, lo que permitió igualar las características geográficas.

Por otra parte, el valor máximo asumible para la diferencia en la distancia desde la costa ha sido asumido por muy pocos estudios. Eliasson (1994), sostiene que la proximidad al mar influye en la magnitud de la isla de calor y atribuye este factor a las tasas medias de enfriamiento de las áreas rurales presentadas en las investigaciones de Oke & Maxwell (1975). Con el propósito de estandarizar el comportamiento de esta variable Martín-Vide *et al.* (2015) establecen que la distancia al mar de los puntos urbanos y no urbanos no debe diferir en mucho más de 800 metros, ya que algunas estimaciones en localidades como Valencia en España han reflejado que la temperatura mínima media anual disminuye en aproximadamente 0.16°C/km con respecto a la distancia al mar. Para el caso del presente estudio, a pesar que la distancia al perfil costero de los puntos no

urbanos reflejó cierta variabilidad, esta distancia se mantuvo en el margen establecido por Martin-Vide *et al.* (2015).

En cuanto a la intensidad de las islas de calor y su máximo térmico es importante precisar que, si bien fue posible especializar y analizar la ICUs, debido a la ubicación latitudinal del Cantón las imágenes satelitales presentaron altos niveles de nubosidad, lo que complejizó el análisis del ráster mediante radar en algunos periodos. El periodo más cálido se vio en reflejado entre el 2020-2021 con una temperatura de 8.88°C mostrando un patrón de espacialidad de poca diferenciación al igual que el estudio de Sarricolea *et al.* (2008) y Williams (2019), afectando principalmente a los barrios Jesús Nazareth, 1 de diciembre, San Juan, los Senderos, entre otros. Por otro lado, la intensidad más leve alcanzada corresponde al periodo 2015-2016 con una temperatura de 7.9°C y una configuración espacial de tipo poli-concéntrico. A su vez, el promedio de años 2015:2021 estimó un máximo térmico de 7.10°C reflejando un patrón de espacialidad también de tipo poli-concéntrico.

Respecto a la configuración de las islas de calor identificadas en el presente estudio, Oke *et al.* (2017) sostienen que los patrones espaciales reflejados en la isla calor se deben a la estrecha relación que guarda el desarrollo urbano local y con los patrones térmicos de la ICUs en cada asentamiento, lo que genera una configuración única, que a su vez se ve modificada por la forma de su orografía, la cubierta vegetal, la distribución de los suelos, los cuerpos de agua y la naturaleza de las formas construidas. Por otro lado, Sarricolea & Romero (2010), sustentados por Lowry (1976), afirman que la configuración espacial que adquiere la isla de calor no es estable y su variabilidad está relacionada con los cambios en la dinámica atmosférica regional y por determinadas condiciones meteorológicas. En este sentido, ninguna de las islas de calor para los periodos evaluados reflejó una configuración concéntrica, por el contrario, entre los años 2015-2016, 2016-2017, 2018-2019 mostró un patrón espacial de tipo policéntrico, mientras que a partir de los años 2019-2020 no reflejó una configuración espacial diferenciada.

Aunque no existe un acuerdo global respecto a la estacionalidad de la máxima intensidad de la isla de calor de superficie, Sarricolea *et al.* (2008) alega que ésta dependerá de las condiciones propias de la localización geográfica. En este sentido, debido a la ubicación latitudinal del Cantón, no mantiene estacionalidades marcadamente diferenciadas (GAD-Manta, 2014), por cuanto sus temperaturas medias oscilan entre los 26.8°C y 24.1°C, mientras que el promedio anual de precipitación es de apenas 300.2 mm. en contraste con otras regiones del mundo. En virtud de aquello, este factor no fue considerado como una condición para determinar la estacionalidad del presente análisis, sujetándose únicamente a la disponibilidad de imágenes satelitales.

Para la interpretación de estos resultados se elaboró una clasificación con categorías para intensidades de las islas de calor basada en la clasificación propuesta por Fernández (1996) y ajustada, fundamentalmente, por los máximos y mínimos térmicos alcanzados en la presente investigación. En base a estas categorías, la intensidad de la isla de calor de superficie tanto en el periodo 2015-2016 como 2020-2021 corresponde a la categoría “muy fuerte” ($> 7^{\circ}\text{C}$). Esta situación coincide con los resultados de Sarricolea (2012), en donde se analizó las intensidades de las islas de calor en las comunas de Santiago, Providencia, Los Condes, Ñuñoa y Victacura con una intensidad superior 7°C . Sin embargo, cada periodo evaluado en el presente estudio reflejó variabilidad en cuanto a la distribución de los patrones espaciales isotérmicos con predominancia de categorías moderadas y moderadamente débiles en los periodos 2015-2019, mientras que se reflejó predominancia de niveles de intensidad moderadamente fuertes y fuertes en los periodos 2019-2021. Esta situación también se refleja en los resultados obtenidos por Williams (2019) donde a pesar de apreciar mayores intensidades en las zonas urbanas las categorías siguen siendo débiles, por lo que no existen tantas diferencias con las zonas rurales.

Entre los factores que alteran la disposición de balance de energía natural a una escala micro y concretamente definen la configuración de isla de calor de superficie se destacan las variables señaladas por las investigaciones de climatología urbana como la vegetación, la exposición a laderas, distancia al mar, altitud y densidad poblacional. Estos factores geográficos han sido ampliamente sustentados por autores como Martin-Vide *et al.*

(2015), Béral-Guyonnet (1997); Cuadrat *et al.*(2005); Hogan y Ferrick (1998); entre otros.

En cuanto a los efectos de la vegetación en la configuración e intensidad de las islas de calor en Cantón es importante precisar que esta variable, al igual que los demás factores geográficos abordados, no permite explicar por sí sola el fenómeno isotérmico. Este planteamiento se sustenta en los estudios de climatólogos como (Carlson *et al.*, 1994); Gillies & Carlson (1995); Owen *et al.* (1998), quienes sostienen que la variabilidad y la relación no lineal que existe entre NDVI y LST sugiere que esta variable puede no ser una métrica suficiente para estudiar cuantitativamente la isla de calor superficial (Yuan & Bauer, 2007). No obstante, el índice normalizado de vegetación diferenciado ha sido empleado en diversos estudios de climatología urbana como el principal indicador del clima urbano, fundamentalmente, porque la cantidad de vegetación determina el flujo de calor latente de la superficie a la atmosfera a través de la evapotranspiración.

A partir del análisis de correlación y regresión múltiple aplicados para cada uno de los periodos evaluados se constató la variabilidad interanual respecto a la correlación entre la cobertura vegetal y la intensidad de la isla de calor, reflejando una relación inversa en la mayoría de los periodos y alcanzando el factor de correlación más alto durante el periodo 2018-2019 (0.402). En el análisis de la relación para el promedio anual 2015:2021 se determinó un factor de correlación de apenas 0.061 considerado como una relación “escasa o nula” de acuerdo con las categorías para el factor de correlación de Pearson. Si bien Setturu *et al.* (2014) afirma que la existencia de vegetación en la cobertura de suelo posee un papel fundamental en la moderación de las temperaturas de una región, estos resultados se ven reflejados por factores como la escasas de cobertura vegetal, el fraccionamiento de la cobertura vegetal y el tipo de vegetación en el Cantón.

De acuerdo al Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2012 y 2014 de Manta, el sistema predominante de cobertura vegetal corresponde a matorral desértico y algunas asociaciones mixtas de bosque seco donde predominan especies arbustivas y monte espinoso tropical. Este sistema constituye remanentes de bosque seco tropical que han sido el resultado del desarrollo urbano en el Cantón. Conforme a los resultados obtenidos

en el presente estudio, en términos generales, aunque el NDVI interanual se mantuvo mayor a 0.8 (vegetación densa), se constató la predominancia de suelo sin cobertura, seguido por zonas con vegetación dispersa o fraccionada, mientras que las zonas con vegetación densa y semidensa son relativamente escasas. En este sentido, si bien el Cantón presenta áreas con cobertura vegetal, estas se mantiene en un rango entre “escasa y dispersa”, constituida principalmente por matorral desértico tropical, caracterizado por una baja capacidad de absorción de energía radiante en comparación con otras composiciones florísticas como bosque tropical semidenso de vigor alto con especies como algarrobo (*Ceratonia siliqua*), pelacaballo (*Leucaena trichodes*), neem (*Azadirachta indica*) o palo santo (*Bursera graveolens*), lo cual limita su capacidad para mantener un flujo de evapotranspiración lo suficientemente amplio para atenuar la intensidad de calor latente en la zona urbana. Por otro lado, aunque existen algunas áreas de vegetación remanente de tipo bosque seco tropical con matorral espinoso desértico que influyeron en la disminución de la intensidad de la isla de calor como las quebradas estacionales de Barbasquillo, la avenida Universitaria y en las áreas adyacentes al aeropuerto; su cobertura espacial no es suficiente para mitigar la intensidad de la temperatura superficial del Cantón por lo que su alcance geográfico es muy limitado.

Entre los efectos más evidentes de la cobertura vegetal en el Cantón, especialmente arbórea, se puede constatar que hasta el periodo 2015-2016, específicamente en la zona adyacente a la avenida 4 noviembre, la intensidad de isla de calor se mantenía en la categoría “muy débil” ($0^{\circ}\text{C} - 2^{\circ}\text{C}$), principalmente, por la presencia del arbolado urbano en la extensión de la vía, sin embargo, a partir de la concreción del proyecto de regeneración urbana “Par Vial”, toda la interfaz de arbolado fue removido para el ampliar la vía, lo que trajo como consecuencias el aumento de las temperaturas hasta 4°C . Este fenómeno concuerda con lo expuesto con Cárdenas-Celis (2019) al estudiar las variaciones de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en espacios abiertos de acuerdo con el agrupamiento de arborización, estimando una diferencia de 4.4°C para agrupamiento de árboles heterogéneos.

De acuerdo a los resultados expuestos, entre la distribución espacial de las islas de calor se observan patrones isotérmicos orientados hacia la periferia del Cantón. Estas

observaciones concuerdan con los resultados de Setturu *et al.* (2014) durante el análisis del comportamiento de la isla de calor en el distrito de Uttara Kannada en India, donde se constató que las regiones costeras y llanuras con menor extensión espacial de vegetación presentaron temperaturas más altas que el interior urbano, con tendencias claras de aumento de la temperatura del aire. Ambos fenómenos concuerdan con lo expuesto por Puliafito *et al.* (2013) quien sostiene que en las zonas áridas la periferia produce temperaturas mayores por falta de humedad y falta de sombras.

Aunque en términos generales la cobertura vegetal no manifestó un factor de correlación considerable para el fenómeno abordado, excepto en el periodo 2018-2019 en donde alcanzó una correlación superior, el análisis de sensibilidad demostró que este factor posee una importancia muy alta ya que al elevar el NDVI en 0.5 podría disminuir la temperatura en casi 5°C. No obstante, fue posible constatar la significancia de otras variables geográficas que manifestaron un factor de correlación superior para el promedio de años 2015:2021. Entre estas variables se destacó notablemente la influencia de la proximidad al mar con una correlación de 0.693. Los resultados permitieron evidenciar un aumento progresivo en la intensidad de los patrones isotérmicos a medida que los barrios se alejan de la zona costera generando núcleos interiores de calor. La influencia de la proximidad al mar con la intensidad de la isla de calor se relaciona con la corriente de vientos anabáticos que provienen del mar y se extiende en el interior la zona urbana del Cantón hasta concebir un efecto de continentalidad. Este fenómeno, según Oke *et al.* (2017), coincide además con los flujos de aire diurnos que soplan desde la costa hacia el continente conocidos como brisas costeras. Esta influencia a su vez se ha podido evidenciar en el estudio de Sarricolea y Romero (2010) donde la configuración espacial de las temperaturas superficiales del área metropolitana de Valparaíso en verano e invierno durante el 2007 manifestaron notables diferencias motivadas por la cercanía al mar y la acción de las brisas oceánicas, lo que redujo temperaturas de la bahía.

Por otro lado, la variable altitudinal manifestó un factor de correlación mayor al de la cobertura vegetal (0.54), lo que supone una relación entre moderada y fuerte con el fenómeno estudiado. Al respecto, Sarricolea *et al.* (2008) sostiene que existe una importante relación entre las elevaciones topográficas y la intensidad de la ICUs

acentuándose hacia el interior de las ciudades debido al menor dominio de los vientos. Esta relación se vio claramente reflejada en el análisis de la isla de calor en el Cantón, ya que se evidenciaron intensidades mayores en aquellas zonas mayores elevaciones como Urbirríos, Nuevo Manta, Los ángeles, Bellavista 2, las Cumbres II, Santa Catalina, Los Senderos, Manta azul, Jesús de Nazareth, entre otros. A su vez, este fenómeno coincide con los resultados obtenidos por Sarricolea (2012) donde se encontró que en el análisis del modelo anual de la isla de calor de superficie la elevación topográfica se relacionó positivamente con la intensidad de la isla de calor en el área Metropolitana de Santiago, lo que sugiere la existencia de inversiones térmicas. A la par, también coinciden con los estudios de Sarricolea *et al.* (2008) donde la elevación topográfica constituyó una de las variables que permitieron explicar de mejor manera la distribución de los patrones isotérmicos de la isla de calor en ciudad de Rancagua (Chile). De igual manera se reflejan similitudes importantes con los resultados de la investigación planteada por Williams (2019) donde la elevación topográfica sostuvo una alta correlación con las intensidades de la isla de calor para el caso específico de la conurbación Gran Valparaíso.

Al respecto de la influencia de la densidad población, el análisis del promedio anual 2015-2021 reflejó un factor de correlación del 0.31 con el fenómeno en cuestión. En cuanto a la densidad poblacional, este factor está asociado con los asentamientos humanos y los cambios del uso de suelo, cuya relación con la intensidad de la isla de calor es débil de acuerdo a las categorías de relación par variables de Pearson (0.25-0.50). Aunque se identificó concentraciones poblacionales en forma de polinúcleos, la intensidad de la isla de calor se asocia más con otros factores geográficos. Este resultado difiere de los observados por Sarricolea *et al.* (2008) donde la configuración e intensidad de la isla de calor urbana en la ciudad de Rancagua (Chile) manifestó alta sensibilidad a la densidad poblacional, pese a que ambas ciudades mantienen niveles de población similares (273.822 habitantes Rancagua – 250.000 habitantes Manta); a su vez difiere con los resultados obtenidos por Neog (2021), al evaluar la dinámica temporal del uso de la tierra y la temperatura de la superficie terrestre en la ciudad de Agartala en India y demostró el creciente grado de correlación entre la densidad de población y la temperatura superficial y a su vez expuso el alarmante crecimiento de la población en la ciudad y la incidencia en el uso del suelo con el aumento térmico de la ciudad.

Finalmente, la exposición a laderas reflejó un factor de correlación de 0.13 respecto a la intensidad de la isla de calor, considerándose una relación nula de acuerdo a las categorías para variables de correlación de Pearson. Este factor se encuentra estrechamente ligado con las cargas de energía solar recibidas por las superficies terrestres. Estas observaciones concuerdan con los resultados obtenidos por Williams (2019) al analizar la intensidad de las islas de calor urbanas superficiales en las principales conurbaciones de la V región de Valparaíso, constatando un factor de correlación de 0.5 durante el invierno. Mientras que, ambos resultados difieren de las observaciones planteadas por Sarricolea & Romero (2010) en donde la exposición de las laderas correspondió a las variables de mayor significancia para explicar la variación espacial de las temperaturas superficiales.

10. CONCLUSIONES

Con los resultados expuestos es posible evidenciar que, a pesar que la cobertura vegetal urbana del Cantón se constituye como la variable geográfica con la correlación estadística más baja asociada a la intensidad de la isla de calor para el promedio de años 2015-2021 con un factor de correlación promedio de 0.061, queda claro que ésta variable sí permite atenuar la intensidad de la isla de calor, ya que el análisis global de la regresión múltiple determinó que un aumento del NDVI de 0.5 permite disminuir la temperatura superficial entre 1.7 y 4.5 °C.

Mediante el índice diferenciado de vegetación normalizada se aprecia que la disponibilidad de cobertura vegetal es relativamente escasa, lo que acentúa la intensidad térmica de la isla de calor urbana diurna. De acuerdo al PDOT 2014 del Cantón, el sistema predominante de cobertura vegetal corresponde a matorral desértico y algunas asociaciones mixtas de bosque seco donde predominan especies arbustivas y monte espinoso tropical. En este ámbito, la diferenciación de la vegetación permitió identificar algunas características fisonómicas de la biomasa fotosintéticamente activa, diferenciando categorías de vegetación de tipo escasa, semidensa y densa, en donde destacan los espacios desprovistos de vegetación, seguidos por espacios de cobertura escasa de tipo matorral desértico, y, en menor cantidad, se diferenciaron las áreas con cobertura densa y semi densa constituidas por vegetación de tipo remanente ubicadas en localidades concretas como en las quebradas del sector Barbasquillo, la ciudadela universitaria y las áreas adyacentes al aeropuerto Eloy Alfaro.

En relación a las formaciones vegetales locales para el control de la intensidad de la isla de calor, a través el índice diferenciado de vegetación normalizada se evidenció el efecto casi nulo de la vegetación dispersa en el control de las temperaturas. Sin embargo, en las zonas con vegetación densa y semi densa se constató una reducción importante de la temperatura superficial (entre 3°C y 4°C), especialmente en sectores como las quebradas estacionales de Barbasquillo, la avenida universitaria y los alrededores del aeropuerto Eloy Alfaro. Esta cobertura vegetal corresponde a remanentes de bosque seco tropical constituido principalmente por especies arbustivas de vigor alto y densidad de follaje con una alta capacidad de absorción de energía radiante y alto nivel de

evapotranspiración, constituyéndose de esta manera como el tipo de formación vegetal que mejor mitigó la intensidad de la isla de calor. No obstante, este efecto fue evidenciado en espacios concretos, por lo que, en el casco urbano, la sustitución de cobertura vegetal por superficies impermeables limita la capacidad de evaporación del agua y así mantener humedad en la atmosfera, lo que origina un incremento de la temperatura superficial.

Por otro lado, la distribución espacial de los patrones térmicos de la isla de calor diurna para la ciudad de Manta durante el promedio de años 2015-2021 manifiesta un incremento que se asocia con el proceso de crecimiento que ha experimentado el Cantón en las últimas décadas, producto del desarrollo urbanístico y económico. Esta variabilidad espacial e interanual presenta una morfología de tipo polinuclear y muestra una marcada concentración de altas temperaturas en la parte suroriental y suroccidental con valores que oscilan entre los 7.9°C y 8.8°C respectivamente, los cuales se asocian a diferentes variables geográficas explicativas como la distancia al mar, las elevaciones topográficas y la densidad poblacional, la exposición a laderas y a la cobertura vegetal. Entre los principales sectores afectados se destacan los barrios: Jesús de Nazareth, Manta azul, COSACE, Arroyo azul, los Senderos, los Ángeles, San Juan, Urbirríos I, Nuevo Manta, Circunvalación, La FAE, Costa azul, Urbanización Marina Blue y 1 de diciembre.

Entre tanto, la relación entre el fenómeno en cuestión y el conjunto de variables geográficas, permitió evidenciar una alta fuerza de correlación estadística entre la distancia al mar y la intensidad de la isla de calor, destacándose como el factor con mayor influencia en la distribución de la temperatura superficial con una correlación de 0.693 para el promedio de años 2015-2021. Esta relación se asocia con la disminución de las temperaturas en las áreas cercanas al perfil costero por la presencia de corrientes de aire anabáticos que provienen del mar y fluyen hacia el interior de la zona urbana incrementando la temperatura superficial a medida que la distancia al mar aumenta. No obstante, ninguna de las variables permite explicar por sí solas la distribución espacial de la isla de calor superficial diurna, por lo que, de acuerdo al coeficiente de determinación obtenido a partir del modelo de regresión múltiple para el promedio de años 2015-2021 (64%), se requiere que sean consideradas en su conjunto.

En consecuencia, la expansión urbanística ha generado un incremento progresivo de la temperatura superficial en la ciudad de Manta, dando paso al surgimiento de islas de calor en diferentes sectores. Por esta razón, resulta necesario adoptar medidas preventivas y correctivas para mitigar la intensidad de la temperatura superficial en las zonas donde ya están presentes. Para este efecto, la vegetación constituye un instrumento importante que permite regular el microclima urbano con amplios servicios ambientales. Si estos cambios no se abordan es probable que se incrementen las condiciones de temperatura más cálidas a medida que avanza el tiempo y con ello la expansión urbana. Los resultados sugieren una planificación local que aborde la climatología urbana en los planes de ordenación urbanística e incorpore políticas orientadas a la conservación y ampliación de áreas verdes.

Finalmente, el presente trabajo representa un primer paso para la mejora de la gestión de la climatología urbana del Cantón. Asimismo, sirve como base para la toma de conciencia de la necesidad de poner en marcha acciones preventivas. Además, constituye un insumo base para investigaciones posteriores, que desbordan la envergadura de esta, como establecimiento de los desafíos y alternativas de gestión para el bienestar de la comunidad.

11. BIBLIOGRAFIA

- Ackerman, B., Changnon, S., & Dzurisin, G. (1978). Summary of METROMEX, volume 2: Causes of precipitation anomalies. In *Urbana*. <http://www.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=ENV&record=7812830>
- Aguilar, H., Mora, R., & Vargas, C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo Flaash del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 53, 39–59.
- Alomar Garau, G., & Llop Garau, J. (2018). La isla de calor urbana de Palma (Mallorca, Islas Baleares): avance para el estudio del clima urbano en una ciudad litoral mediterránea. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 78, 392–418. <https://doi.org/10.21138/bage.2404>
- Aragoneses de la Rubia, E. (2020). Caracterización de la isla de calor urbana en el campus de la UAM por medio de teledetección. *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 26, 43–67. <https://doi.org/10.21138/gf.678>
- Arboit, M. E. (2018). Estimación del índice de vegetación, en entornos urbanos forestados consolidados de baja densidad del área Metropolitana de Mendoza, Argentina. *Cuaderno Urbano*, 23(23), 33. <https://doi.org/10.30972/crn.23232688>
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Atkinson, B. W. (1987). Atmospheric Processes: Global and Local. In M. J. Clark, K. J. Gregory, & A. M. Gurnell (Eds.), *Horizons in Physical Geography* (pp. 121–133). Macmillan Education UK. https://doi.org/10.1007/978-1-349-18944-1_8
- Béral-Guyonnet, I. (1997). Analyse spatiale des températures mensuelles dans l'agglomération lyonnaise: l'îlot de chaleur urbain / Spatial analysis of monthly temperatures in the city of Lyon. *Revue de Géographie de Lyon*, 72(4), 263–266. <https://doi.org/10.3406/geoca.1997.4705>

-
- Berdahl, P., & Bretz, S. E. (1997). Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. *Energy and Buildings*, 25(2), 149–158. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(96\)01004-3](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(96)01004-3)
- Blázs, B., Unger, J., Gál, T., Sümeghy, Z., Geiger, J., & Szegedi, S. (2009). Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters: empirical modelling, verification and extension. *Meteorological Applications*, 16, 275–287. <https://doi.org/10.1002/met>
- Campbell-Lendrum, D., & Corvalán, C. (2007). Climate change and developing-country cities: Implications for environmental health and equity. *Journal of Urban Health*, 84(SUPPL. 1), 109–117. <https://doi.org/10.1007/s11524-007-9170-x>
- Cárdenas-Celis, A. M. (2019). *La influencia de la arborización y de la pavimentación en el confort térmico urbano en la avenida Leopoldo Machado, Macapá- Brasil, 2017*. [UNIVERSIDAD RICARDO PALMA]. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/1867>
- Carlson, T. N., Gillies, R. R., & Perry, E. M. (1994). A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 9(1–2), 161–173. <https://doi.org/10.1080/02757259409532220>
- Carrasco, C., Palme, M., & Galvez, M. (2016). Factor de cielo visible y el efecto de isla de calor en Valparaíso. *Revista Urbano*, 19(34), 26–33. <https://doi.org/10.22320/07183607.2016.19.34.3>
- Castro, S. (2005). Evaluación de un índice para valorar las áreas verdes urbanas: su aplicación y análisis en la localidad de barrio Dent y Altos del Escalante con una perspectiva geográfica. *Reflexiones*, 84(1), 107–125.
- Changnon, S. A., Huff, F. A., Schickedanz, P. T., & Vogel, J. L. (1977). Summary of METROMEX , Volume1: Weather Anomalies and Impacts. In *Weather*.
- Córdova Sáez, K. (2012). Impacto de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana. Análisis estacional comparativo: Caracas, octubre-2009, marzo-2010. *Terra. Nueva Etapa*, 27(42).

-
- Cuadrat-Prats, J. M., Vicente-Serrano, S. M., & Saz, M. A. (2005). Spatial patterns of the urban heat island in Zaragoza (Spain). *Climate Research*, 30(1), 61–69. <https://doi.org/10.3354/cr030061>
- Domínguez, P. (2002). Clima regional y microclimas urbanos en la provincia de Córdoba. *Servicios de Publicaciones de La Universidad de Córdoba*, 110. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=100446>
- Eliasson, I. (1994). Urban-suburban-rural air temperature differences related to street geometry. *Physical Geography*, 15(1), 1–22. <https://doi.org/10.1080/02723646.1994.10642501>
- Ellefsen, R. (1991). Mapping and measuring buildings in the canopy boundary layer in ten U.S. cities. *Energy and Buildings*, 16(3–4), 1025–1049. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90097-M](https://doi.org/10.1016/0378-7788(91)90097-M)
- Fernández, F. (1996). Manual de Climatología aplicada. Clima, medio ambiente y planificación. In Editorial Síntesis (Ed.), *Espacios y sociedades* (Vol. 2). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=199127>
- Fernández, Felipe, & Martilli, A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid. *Revista Indice*, 21–24.
- Ferrelli, F., Bustos, M. L., Huamantínco-Cisneros, M. A., & Piccolo, M. C. (2015). Utilización de imágenes satelitales para el estudio de la distribución térmica en distintas coberturas del suelo de la ciudad de Bahía Blanca (Argentina). *Revista de Teledeteccion*, 2015(44), 31–42. <https://doi.org/10.4995/raet.2015.4018>
- Flores-De la O, J., Villanueva-Solis, J., & Quiroa-Herrera, J. (2018). Evaluación de los efectos microclimáticos que tiene la vegetación en la mitigación de la isla de calor urbana: Parque en la ciudad de Torreón, México. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(2), 16. <https://doi.org/10.15359/rca.52-2.7>
- Fuentes Pérez, C. (2015). Climatología urbana por modificación antropogénica. alteración del balance de energía natural. *Revista de La Facultad de Arquitectura de La Universidad Autónoma de Nuevo León*, IX(11), 73–91. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6336498>

-
- García, F. F. (2011). *La climatología urbana en España en los últimos 30 años*.
<https://www.divulgameteo.es/fotos/meteoroteca/Climatología-urbana-España.pdf>
- Geiger, R. (1967). The climate near the ground. In *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* (Vol. 93, Issue 395, pp. 150–151). John Wiley & Sons, Ltd.
<https://doi.org/10.1002/qj.49709339529>
- Gillies, R. R., & Carlson, T. N. (1995). Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models. *Journal of Applied Meteorology*, 34(4), 745–756. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034<0745:TRSOSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<0745:TRSOSS>2.0.CO;2)
- Gobierno Autonomo Descentralizado Municipal del Cantón Manta. (2019). *Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial con especial énfasis en la gestión del riesgo Manta*.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Manta. (2014). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2014 - 2019*.
<https://manta.gob.ec/db/municipio/Planes-programas-proyectos/2020/PDOT-DOCUMENTO-FINAL-BAJAS-2014-2019.pdf>
- Guhathakurta, S., & Gober, P. (2007). The impact of the Phoenix urban heat Island on residential water use. *Journal of the American Planning Association*, 73(3), 317–329. <https://doi.org/10.1080/01944360708977980>
- Guillén, V., & Orellana, D. (2017). Un acercamiento a caracterizar la isla de calor en Cuenca, Ecuador. *Civitic*, December, 71–84.
https://www.researchgate.net/publication/311509860_UN_ACERCAMIENTO_A_CHARACTERIZAR_LA_ISLA_DE_CALOR_EN_CUENCA_ECUADOR/link/5849749608ae82313e7103d4/download
- Hogan, A. W., & Ferrick, M. G. (1998). Observations in nonurban heat islands. *Journal of Applied Meteorology*, 37(2), 232–236. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1998\)037<0232:OINHI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1998)037<0232:OINHI>2.0.CO;2)
- Howard, L. (1833). The Climate of London. *The Geographical Journal*, 132(1), 84.
<https://doi.org/10.2307/1793062>

-
- Huang, Y. J., Akbari, H., & Taha, H. (1990). The wind-shielding and shading effects of trees on residential heating and cooling requirements. *Proceedings of the ASHRAE Winter Conference*, 1403–1411.
- INEC. (2010). Proyecciones Poblacionales. In *Proyecciones Poblacionales* (p. 1).
- Kurn, D. M., Bretz, S. E., & Akbari, H. (1994). The Potential for Reducing Urban Air Temperatures and Energy Consumption Through Vegetative Cooling Sources of Moisture in Urban Areas. *Lawrence Berkeley National Lab*, 4, 155–166. <http://eec.ucdavis.edu/ACEEE/1994-96/1994/VOL04/155.PDF>
- Landsberg, H. (1981). The urban climate. In *The urban climate*. (1st ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.2307/214663>
- Lattes, A. (1995). Urbanización, crecimiento urbano y migraciones en América Latina. In *Notas de población* (Issue 62, pp. 211–260). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Organización de las Naciones Unidas. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/38594/NP62-06_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Li, Z.-L., & Duan, S.-B. (2018). Land Surface Temperature. In Shunlin Liang (Ed.), *Comprehensive Remote Sensing* (pp. 264–283). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10375-6>
- Lindén, J., Fonti, P., & Esper, J. (2016). Temporal variations in microclimate cooling induced by urban trees in Mainz, Germany. *Urban Forestry and Urban Greening*, 20, 198–209. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.09.001>
- López Gómez, A., López Gómez, J., Fernández Garcías, F., & Arroyo Ilera, F. (1991). *El clima urbano: Teledetección de la isla de calor en Madrid* (C.-C. Press. (ed.)). Centro de Investigaciones sobre la Economía, la Sociedad y el Medio. [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=JEWPsCRjv7YC&oi=fnd&pg=PA5&dq=\(López+Gómez+et+al,+1993&ots=3HjDctJgKL&sig=VJpXFnlzIyaj0pNwKnYaOtsZNug#v=onepage&q=\(López+Gómez+et+al%2C+1993&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=JEWPsCRjv7YC&oi=fnd&pg=PA5&dq=(López+Gómez+et+al,+1993&ots=3HjDctJgKL&sig=VJpXFnlzIyaj0pNwKnYaOtsZNug#v=onepage&q=(López+Gómez+et+al%2C+1993&f=false)
- Lowry, W. P. (1976). Empirical Estimation of Urban Effects on Climate: A Problem Analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 36, 1391–1397.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016<0129:EEOUEO>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<0129:EEOUEO>2.0.CO;2)

Manley, G. (1959). *On the frequency of snowfall in metropolitan England*. 1(42), 70–72. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/qj.49708435910>

Martin-Vide, J., Sarricolea, P., & Moreno-García, M. C. (2015). On the definition of urban heat island intensity: The “rural” reference. *Frontiers in Earth Science*, 3, 24. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00024>

Martínez-Barbáchano, R. (2020). Estimación de la temperatura superficial en imágenes históricas Landsat 5 mediante corrección atmosférica monocanal en el térmico para la cuenca del río Tempisque-Bebedero (Costa Rica). *Revista Geográfica de América Central*, 2(65), 17–32. <https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.1>

Martínez, N. (2021). *Evolución de las islas de calor urbanas en el periodo 2002-2020 y su relación con las zonas climáticas locales de las comunas de concepción, Talcahuano y Hualpén, región del Biobío, Chile*. Universidad de Chile.

Martini, A., Biondi, D., & Batista, A. C. (2017). Urban Forest Components Influencing Microclimate and Cooling Potential. *Revista Arvore*, 41(6). <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000600003>

Mauelshagen, F. (2018). Climate as a Scientific Paradigm—Early History of Climatology to 1800. In *The palgrave handbook of climate history* (pp. 565–588). <https://doi.org/10.1057/978-1-137-43020-5>

Meehl, G. A., & Tebaldi, C. (2004). More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305(5686), 994–997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>

Mills, G. (2014). Urban climatology: History, status and prospects. *Urban Climate*, 10(P3), 479–489. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.06.004>

Moreno-García, M. del C. (1999). *Climatología urbana* -. Universidad de Barcelona. https://books.google.cl/books?id=nNQa8pIAIw8C&pg=PA30&hl=es&source=gbs_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false

-
- Moreno, C. (2010). *Climatología urbana* - (Universita). Universitat de Barcelona. https://books.google.com.ec/books?id=kWi_BAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ViewAPI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Moreno, C., & Serra, J. (2016). El estudio de la isla de calor urbana en el ámbito mediterráneo: una revisión bibliográfica. In *REVISTA BIBLIOGRÁFICA DE GEOGRAFÍA Y CIENCIAS SOCIALES: Vol. XXI* (p. 32). <http://www.ub.edu/geocrit/b3w-1179.pdf>
- Neog, R. (2021). Evaluation of temporal dynamics of land use and land surface temperature (LST) in Agartala city of India. *Environment, Development and Sustainability*, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01572-0>
- Ninyerola, M., Pons, X., & Roure, J. M. (2005). Atlas Climático Digital De La Península Ibérica. *Universtat Autonoma de Barcelona*, 45. <http://opengis.uab.es/wms/iberia/pdf/acdpi.pdf>
- Oke, T. R. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat Islands. *Atmosphere*, 14(4), 268–277. <https://doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422>
- Oke, T. R. (1995). The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects. *Wind Climate in Cities, January 1995*. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3686-2>
- Oke, T. R. (2004). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. *World Meteorological Organization*, 81, 51. <http://www.geog.ubc.ca/~toke/IOM-81-UrbanMetObs.pdf>
- Oke, T. R., Johnson, G. T., Steyn, D. G., & Watson, I. D. (1991). Simulation of surface urban heat islands under “ideal” conditions at night part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, 56(4), 339–358. <https://doi.org/10.1007/BF00119211>
- Oke, T. R., & Maxwell, G. B. (1975). Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmospheric Environment (1967)*, 9(2), 191–200. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(75\)90067-0](https://doi.org/10.1016/0004-6981(75)90067-0)

-
- Oke, T. (1982). The energetic basis of urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, Timothy. (1987). *Boundary Layer Climates* (II). https://www.academia.edu/16752781/T_R_Oke_Boundary_Layer_Climates_1988_PDF
- Oke, Timothy, Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Olcina Cantos, J. (1996). El clima: factor de diferenciación espacial. Divisiones regionales del mundo desde la antigüedad al S. XVIII. *Investigaciones Geográficas*, 15, 79. <https://doi.org/10.14198/ingeo1996.15.07>
- Olivio, A. (2017). *Clasificación de la vegetación del Karst de Sierra de las nieves utilizando imágenes Landsat* [Universidad Politécnica de Madrid]. http://oa.upm.es/48286/1/TFM_Angelica_Antonia_Olivo_Candelario.pdf
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París*. 25, 29. <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>
- Ortega-Martinez, M., Rosa, M., Tuya, P., C, L., Pérez Abreu, A., & Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas.*, 8(2), 20.
- Owen, T. W., Carlson, T. N., & Gillies, R. R. (1998). An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization. *International Journal of Remote Sensing*, September 2012, 37–41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/014311698215171>
- Parsons, A. J. (1985). Principles of Remote Sensing. By P. J. Curran. (London: Longman, 1985) [Pp. 260.] Price £1195. *International Journal of Remote Sensing*, 6(11), 1765–1765. <https://doi.org/10.1080/01431168508948322>
- Pava, P. andrea. (2020). Vegetación urbana como estrategia para reducir la contaminación del aire en áreas urbanas. *Universidad Del Tolima*.
- Perdomo, D. (2009). Contaminantes aéreos y sus efectos en pacientes alérgicos del Valle

-
- de Caracas. *Gaceta Medica de Caracas*, 117(4), 274–313.
https://www.researchgate.net/publication/341106211_CONTAMINANTES_AER_EOS_Y_SUS_EFECTOS_EN_PACIENTES_ALERGICOS_DEL_VALLE_DE_CARACAS
- Pulifiato, S. E., Bocacha, F., & Allende, D. (2013). Mitigación de la isla de calor en ciudades zonas áridas. *Proyecciones*, 11(2), 29–45.
<https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/6578>
- Quattrochi, D. A., & Luvall, J. C. (2004). Thermal Remote Sensing in Land Surface Processing. In *Thermal Remote Sensing in Land Surface Processing* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203502174>
- Rao, P. K. (1972). *Remote Sensing of Urban Heat Islands from an Environmental Satellite*. Bulletin of the Meteorological Society. <https://scirp.org/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2208155>
- Ribeiro, A. G. (1993). As escalas do clima. *Boletim de Geografia Teoretica*, 23(45–46), 288–294. <http://biblat.no-ip.org/revista/boletim-de-geografia-teoretica/articulo/as-escalas-do-clima>
- Roa-Espinosa, A., Wilson, T. B., Norman, J. M., & Johnson, K. (2003). Predicting the impact of urban development on stream temperature using a thermal urban runoff model (TURM). *National Conference on ...*, January 2003, 369–389. <http://www.epa.gov/owow/NPS/natlstormwater03/31Roa.pdf>
- Romero, M. (2001). *Arquitetura Bioclimática do Espaço Público*. https://www.researchgate.net/publication/342851204_Arquitetura_Bioclimatica_d_o_Espaco_Publico
- Romero, S., & Romero, F. S. (2006). *La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental*. 24, 13–41. <https://www.redalyc.org/pdf/494/49402403.pdf>
- Roth, M. (1993). Turbulent transfer relationships over an urban surface. II: Integral statistics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 119(513), 1105–1120. <https://doi.org/10.1002/qj.49711951312>

-
- Sarricolea Espinoza, P. (2012). *La isla de calor urbana de superficie y sus factores condicionantes el caso del área metropolitana de Santiago* [Universitat de Barcelona]. <http://www.tdx.cat/handle/10803/86936>
- Sarricolea, P., Aliste, E., Castro, P., & Escobedo, C. (2008). Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología*, 8, 71–84. <https://core.ac.uk/download/pdf/26890748.pdf>
- Sarricolea, P., & Martín-Vide, J. (2014). El estudio de la Isla de Calor Urbana de Superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y Análisis de Componentes Principales. *Revista de Geografía Norte Grande*, 141(57), 123–141. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022014000100009>
- Sarricolea, P., & Romero, H. (2010). Análisis de los factores condicionantes sobre las temperaturas de emisión superficial en el área metropolitana de Valparaíso, Chile. *ACE: Architecture, City and Environment*, 79–96. <https://doi.org/10.5821/ace.v5i14.2507>
- Schmid, H. P. (1994). Source areas for scalars and scalar fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 67(3), 293–318. <https://doi.org/10.1007/BF00713146>
- Setturu, B., Ramachandra, T. V., & Rajan, K. . (2014). *Land Surface Temperature Responses to Land Use Land Cover Dynamics*. July, 1–10. <https://doi.org/10.4172/2327>
- Sierra, K. (2019). *Análisis espacial de la de la distribución térmica y el índice de vegetación normalizada a partir del crecimiento urbano en la ciudad de Montería para los años 2003 y 2019*. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/3479>
- Siu, L. W., & Hart, M. A. (2013). Quantifying urban heat island intensity in Hong Kong SAR, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(5), 4383–4398. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2876-6>
- Soto-Estrada, E. (2019). Estimation of the urban heat island in medellin, Colombia. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 35(2), 421–434.

<https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.02.13>

Stewart, I., & Oke, T. (2009). Classifying urban climate field sites by “local climate zones”: the case of nagano , japan. *The Seventh International Conference on Urban Climate*, July, 1–5.

U.S. Environmental Protection Agency. (2008). Urban Heat Islands Basics. In *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies* (Vols. 2016-Novem). <https://doi.org/10.1109/IICPE.2016.8079546>

United Nations / Habitat (UN). (2011). *Global Report on Human Settlements 2011. Cities and Climate Change* (Vol. 14, Issue 3). Earthscan. <https://doi.org/10.1350/enlr.2012.14.3.162>

Van Hove, L. W. a, Steeneveld, G. J., Jacobs, C. M. J., Heusinkveld, B. G., Elbers, J. A., Moors, E. J., & Holtslag, A. A. M. (2011). Exploring the Urban Heat Island Intensity of Dutch cities; Assessment based on a literature review, recent meteorological observations and datasets provided by hobby meteorologists. In *Alterra report 2170* (Issue April). www.alterra.wur.nl/uk

Vilela, M., & Moschella, P. (2017). Paisaje y expansión urbana sobre espacios naturales en ciudades intermedias. El caso de Purrumpampa en Huamachuco, La Libertad, Perú. *Paysage et expansion urbaine sur les espaces naturels dans les villes intermédiaires. Le cas de Purrumpampa à Huamachuco, L. Bulletin de l'Institut Français d'études Andines*, 46(46 (3)), 529–550. <https://doi.org/10.4000/bifea.9003>

Voogt, J. A., & Oke, T. R. (1997). Complete urban surface temperatures. *Journal of Applied Meteorology*, 36(9), 1117–1132. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036<1117:CUST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036<1117:CUST>2.0.CO;2)

Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)

Wanner, & Filliger. (1989). Orographic influence on urban climate. *Weather and Climate*, 9(1), 22. <https://doi.org/10.2307/44279768>

-
- Williams Castro, C. (2019). Intensidad de las islas de calor urbanas superficiales en las principales conurbaciones de la v región de Valparaíso y factores geográficos explicativos para el caso específico de la conurbación del Gran Valparaíso. In *Universidad de Chile* (Vol. 53, Issue 9).
- Yevez, A. (1993). *La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales* (S. Gandía & J. Meliá (eds.)). Universidad de Valencia. Departamento de termodinámica.
<https://books.google.es/books?id=KBP4UfsRytMC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Yoshino, M. (1975). *Climate in a small area – an introduction to local meteorology: Vol. i.* Universidad of Tokyo.
<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49710243326>
- Yuan, F., & Bauer, M. E. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106(3), 375–386.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003>
- Zambrano, F. J. (2019). *Del muelle a la avenida - Analisis morfologico - espacial de las estructuras de centralidades en Manta, Ecuador y su hinterland* [Universitat Politecnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/179316>