



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA



“ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA ISLA DE CALOR URBANA EN LA CIUDAD DE MORELIA MICHOACÁN”

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(INICIT)**

MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

DOCUMENTO DE TESIS

Que presenta:

BIÓL. EDGAR MORA DAMIAN

Para obtener el grado de:
Maestro en ciencias y planificación del territorio

Directora de Tesis:
Dra. ERNA MARTHA LÓPEZ GRANADOS

Co-Director de Tesis:
Dr. ALBERTO GÓMEZ-TAGLE CHÁVEZ

Morelia, Michoacán, México. Agosto del 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre Dolores Damián Medina y a mi padre Mariano Alfredo Mora Ayala por el apoyo ilimitado que me brindan durante años para mi formación académica y profesional. Por su apoyo moral, paciencia, sabiduría y confianza que me ofrecen para cumplir mis objetivos.

Al Dr. Alberto Gómez-Tagle Chávez por su colaboración y cooperación en mi proyecto de Tesis de Maestría, contribuyendo al mismo tiempo en mi aprendizaje para mi formación en el ámbito profesional.

A la Dra Erna Martha López Granados por haber participado como directora de tesis.

A los sinodales: Dr. Phillipe Lobbit, Dr. Jean Francois Mas, Dr. Adrián Ghilardi, y Dr. Luis Miguel Morales Manilla; por revisar y hacer aportes al presente trabajo.

Índice

1. RESUMEN.....	1
2. ABSTRACT.....	1
3. PRESENTACIÓN.....	2
4. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	3
4.1 CRECIMIENTO POBLACIONAL URBANO.....	3
4.2 CLIMATOLOGÍA URBANA.....	5
5. ANTECEDENTES GENERALES.....	11
5.1 FENÓMENO DE ISLA DE CALOR URBANA (ICU).....	11
5.1.1 CARACTERÍSTICAS Y TIPOS DE LA ISLA DE CALOR URBANA.....	12
5.1.2 CAUSAS DE LA ISLA DE CALOR URBANA.....	14
6. JUSTIFICACIÓN.....	19
7. OBJETIVOS.....	20
8. HIPÓTESIS.....	20
9. BIBLIOGRAFÍA.....	21
10. RESULTADOS.....	25
10.1 VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE ISLA DE CALOR E ISLA FRÍA SUPERFICIAL DIURNA EN MORELIA MICHOACÁN.....	25
10.2 ANÁLISIS ESTACIONAL DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL Y SU RELACIÓN CON LA ISLA DE CALOR E ISLA FRÍA URBANA SUPERFICIAL EN MORELIA MICHOACÁN.....	42
10.3 ISLA DE CALOR URBANA DURANTE LA ÉPOCA HÚMEDA 2015 EN MORELIA, MICHOACÁN.....	54
11. DISCUSIÓN GENERAL E INTEGRACIÓN DE RESULTADOS.....	74

1. RESUMEN

Actualmente el 54% de la población vive en zonas urbanas que presentan características y fenómenos climáticos particulares, como la isla de calor urbana (ICU). Este fenómeno se define como el aumento en la temperatura de las zonas urbanas respecto al área circundante. Se estudió la variación térmica, la presencia e intensidad (temperatura promedio urbana menos temperatura promedio rural) de la Isla de Calor Urbana atmosférica (ICUa) y superficial (ICUs) durante un periodo de un año en la Ciudad de Morelia, Michoacán. Para la medición de temperatura ambiente se emplearon 14 estaciones climáticas distribuidas en distintos usos de suelo; urbano (n=7), suburbano (n=2), rural (n=3) y áreas verdes (n=2). La ciudad presentó una ICUa a lo largo del día con excepción de las 9:00 horas durante la época cálida-seca, en donde se encontró una intensidad negativa (-0.3 °C). La intensidad promedio anual fue de 1.9°C y alcanzó su máximo durante el día en la época lluviosa (3.9°C). Para identificación de la ICUs se utilizaron 12 imágenes satelitales térmicas (Landsat 8) mensuales. La ciudad presentó una ICUs en los meses de junio a diciembre con una intensidad máxima de 7.2°C en el mes de septiembre y una isla fría de enero a mayo siendo este último el de mayor intensidad (2.5°C). Los análisis de varianza y pruebas de Tukey realizadas en todas las fechas, mostraron que existen diferencias significativas entre los usos de suelo, a excepción del mes de diciembre y marzo. Por último se discuten las variables de formación de la ICU.

Palabras clave: Isla de calor urbana, isla fría, temperatura ambiente, imagen térmica. áreas verdes .

2. ABSTRACT

Currently, 54% of the population lives in urban areas with particular climatic characteristics and phenomena, such as the urban heat island (UHI). This phenomenon is defined as the increase in the temperature of the urban areas with respect to the surrounding area. The present study investigated the thermal variation, presence and intensity (mean urban temperature minus rural average temperature) of the Island of Urban Heat (UHI) and surface (SUHI) during a period of one year in the City of Morelia, Michoacán. For the measurement of ambient temperature, 14 climatic stations are used distributed in different land uses; urban (n = 7), suburban (n = 2), rural (n = 3) and green areas (n = 2). The city presents an UHI throughout the day except for 9:00 am during the warm-dry season, where a negative intensity (-0.3 ° C) was found. The average annual intensity was 1.9 ° C and reached its maximum during the day in the rainy season (3.9 ° C). For the identification of the SUHI, 12 monthly satellite images (Landsat 8) were used. The city presented an SUHI in the months of June to December with a maximum intensity of 7.2 ° C in the month of September and a cold island from January to May. May had the highest intensity of a cold island (2.5 ° C). Analyzes of variance and Tukey's tests performed on all dates showed that there are significant differences between land uses, with the exception of December and March. Finally, the training variables of the ICU are discussed.

Keywords: Urban heat island, cold island, ambient temperature, thermal image

3. PRESENTACIÓN

El presente trabajo de tesis representa un esfuerzo para entender como se produce y como es la variación espacio-temporal del fenómeno de isla de calor urbana en la ciudad de Morelia. La estructura de este escrito está conformada por tres grandes secciones:

1) Introducción, antecedentes, justificación, objetivos e hipótesis: En la introducción se hace una revisión del estado actual de la población humana en cuanto a su distribución en zonas rurales y urbanas y una revisión de los fenómenos climáticos que ocurren en las zonas urbanas visto desde el punto de la climatología urbana. En los antecedentes se hace un análisis bibliográfico de las causas del fenómeno de isla de calor urbana y, por último, se presenta justificación de la realización de este estudio y el planteamiento general del problema que se aborda en el presente trabajo para fundamentar los objetivos del mismo.

2) Resultados: Esta sección se conforma de tres subcapítulos redactados como documentos independientes.

- El primer subcapítulo escrito a manera de artículo científico versa sobre la variación espacial y temporal de la isla de calor superficial utilizando imágenes multiespectrales proveídas por la misión de Landsat 8. El texto se encuentra en preparación para ser enviado a arbitraje como artículo original a la revista Urban Climate.
- El segundo texto independiente comprende el análisis de datos de temperatura ambiental y superficial, utilizando los datos de un periodo de un año de 10 estaciones termométricas que miden la temperatura ambiente construidas y calibradas como parte del proyecto, desplegadas en diferentes uso de suelo en la ciudad de Morelia, 3 estaciones climáticas del sistema de monitoreo climático del organismo operador de agua potable de la ciudad de Morelia (OOAPAS) y una estación ubicada en la UNAM campus Morelia. Se exploró la relación entre la temperatura ambiente y la temperatura superficial obtenida a partir de la información de teledetección térmica infrarroja.
- En el último texto se realiza un análisis mas detallado sobre la isla de calor urbana atmosférica durante la temporada lluviosa del 2015, empleando 10 estaciones termométricas y los datos proveídos por la estación UNAM. Este documento ya ha sido enviado como artículo original para ser publicado en la revista Investigaciones Geográficas del Instituto de Geografía de la UNAM.

Dado que los textos, están preparados en forma independiente y que se siguió una metodología particular para cada uno de las partes del estudio. Cada texto comprende introducción, metodología, resultados, discusión y conclusión.

3) Discusión General e integración de resultados: En esta parte se hace una integración de los resultados para generar propuestas para la mitigación del fenómeno de isla de calor en la ciudad de Morelia. También se hace un resumen de los productos obtenidos en el presente estudio y recomendaciones tanto a las instituciones que proveen datos climáticos en la ciudad como para trabajos futuros en el tema.

4. INTRODUCCIÓN GENERAL

4.1 CRECIMIENTO POBLACIONAL URBANO

Antes del siglo XX, la mayor parte de población humana vivió y trabajó principalmente en zonas rurales, pero a partir del año 2008 por primera vez en la historia de la humanidad, la mitad de la población humana se encuentra habitando en asentamientos urbanos (UNFPA, 2007) es por esto que en la primera mitad del siglo XXI, el crecimiento de las ciudades será el factor más influyente en el desarrollo (UNFPA, 1996).

En el 2014 la división de población del departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (DAES) publicó nuevas estimaciones y proyecciones poblacionales de las zonas urbanas y rurales para grandes áreas urbanas, regiones y países del mundo. Donde se menciona que el 54% de la población mundial vive en zonas urbanas, y se espera que esta proporción aumente a 66 por ciento en 2050 (ONU, 2014a).

En cuanto a las poblaciones rurales se espera que disminuyan a medida que las poblaciones urbanas siguen creciendo tal como lo muestra el Informe de “La situación demográfica en el mundo 2014” donde se plantea que la población urbana mundial pasó de 2.300 millones de personas en 1994 a 3.900 millones en 2014, y se prevé que ascienda a 6.300 millones para 2050. En comparación, el tamaño de la población rural apenas experimentó cambios entre 1994 y 2014, y está previsto que comience a contraerse, lo que significa que las zonas rurales podrían tener 300 millones menos de habitantes para 2050 que en la actualidad (ONU, 2014b) (Figura 1).

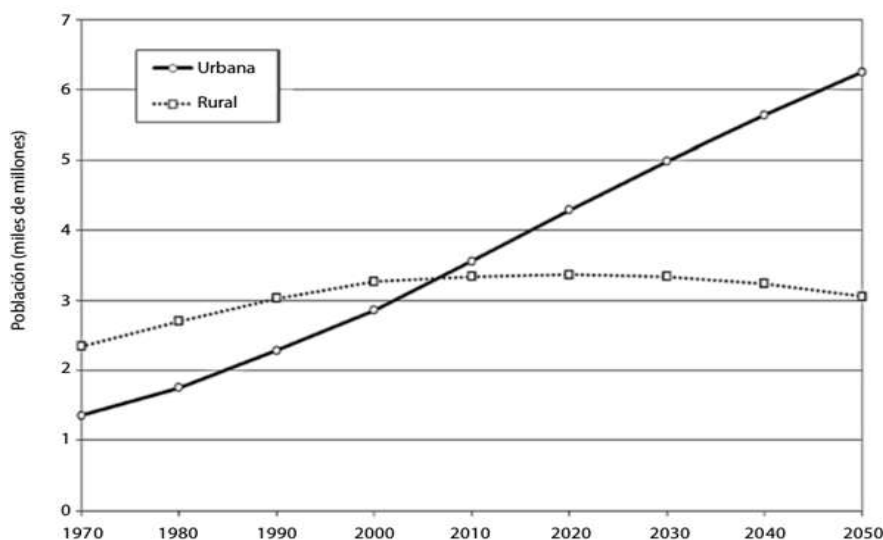


Figura 1. Estimación de la población urbana y rural del mundo, 1970 a 2050 (ONU, 2014b)

Existen marcadas diferencias en el nivel y la rapidez de la urbanización entre las principales zonas del mundo, y existen variaciones aún mayores entre países y ciudades. En el caso de América Latina y el Caribe las tres cuartas partes de la población vivían en asentamientos urbanos en 2014, y en la actualidad son una región predominantemente urbana cuyos niveles de urbanización son comparables a los de América del Norte y a los de muchos países europeos (ONU, 2014b) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Nivel de Urbanización por región (Habitat, 2012).

REGIÓN	URBANIZACIÓN 2010 (%)	URBANIZACIÓN 2050 (%)
MUNDO	50.6	70
REGIONES MAS DESARROLLADAS	75	86
Europa	72.6	83.8
Europa del este	68.8	80
Europa del norte	84.4	90.7
Europa del sur	67.5	81.2
Europa del oeste	77	86.5
REGIONES MENOS DESARROLLADAS	45.3	67
África	40	61.8
África subsahariana	37.3	60.5
África del este	23.7	47.6
África del norte	52	72
África del sur	58.8	77.6
África del oeste	44.6	68
Asia	42.5	66.2
Este de Asia	48.5	74.1
Centro y sur de Asia	32.2	57.2
Sureste de Asia	48.2	73.3
Oeste de Asia	66.3	79.3
Latinoamérica y el caribe	79.4	88.7
América central	71.7	83.3
Sudamérica	83.7	91.4
Resto del mundo		
Norteamérica	82.1	90.2
Oceanía	70.6	76.4

Los problemas asociados con el crecimiento urbano y la sostenibilidad global suelen ser tratados como temas independientes y se traduce con frecuencia en políticas ineficaces y, a menudo conduce a consecuencias no deseadas lamentables y a veces desastrosas. Las políticas destinadas a controlar los movimientos de población y la expansión de los barrios marginales de las grandes ciudades, o para revertir la decadencia urbana, han resultado en gran medida ineficaces o contraproducentes, a pesar de hacer gastos enormes (Bettencourt y West, 2010). Esto ha provocado que el espacio que ocupan los asentamientos urbanos este aumentando más rápidamente que la propia población urbana ya que se prevé que entre el 2000 y 2030, la población urbana del mundo aumente un 72%, mientras que la superficie de las zonas edificadas donde viven 100.000 o más personas podría aumentar en un 175% (UNFPA, 2007).

4.2 CLIMATOLOGÍA URBANA

Como consecuencia del proceso de urbanización generalizado ocurrido en el transcurso del pasado y el presente siglo se ha ido despertando un creciente interés por el estudio del medio físico de las ciudades y, particularmente, por el del clima urbano. Este interés por el estudio del clima urbano está bien justificado, ya que como se ha descrito en el capítulo anterior, la mayor parte de la población reside en zonas urbanas y estas áreas constituyen sectores con condiciones climáticas particulares dentro de la región climática donde se localizan.

Este interés en el clima urbano responde no sólo a la necesidad de lograr un conocimiento para conseguir un ambiente más agradable para los habitantes de las ciudades, sino, también, a la de analizar y prever las modificaciones y repercusiones que pueden tener las zonas urbanas en el clima (Moreno, 1999).

El estudio del clima urbano no es algo nuevo ni algo que apenas se este desarrollado (Hebbert, 2014) ya que los antecedentes de la climatología urbana se remontan a la investigación empírica del siglo XIX por parte del farmacéutico inglés Luke Howard (1772-1864) el cual analizó el clima urbano de Londres y encontró que la temperatura del aire en muchas ocasiones era mayor sobre la ciudad comparado con las zonas rurales colindantes (Howard, 1818). En el siglo antepasado también se desarrollaron otros trabajos como es el caso del ambiente térmico en París (Renou, 1868), Munich (Wittwer, 1960) y Berlín (Kremser, 1866).

También han surgido asociaciones cuyo objetivo es el estudio del clima urbano como la Asociación Internacional para Climas urbanos (IAUC) la cual tomó su forma actual hasta el año 2000, pero su conformación partió décadas atrás en reuniones como el “simposio Bruselas” y la reunión de “Climas urbanos y Climatología de la construcción” de 1968, cuando la Organización Mundial Meteorológica (OMM) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) reunieron por primera vez a especialistas de muchas disciplinas con el objetivo de comprender el ambiente urbano y aplicar este conocimiento para su mejora (Hebbert, 2014).

Por lo tanto la climatología urbana es una ciencia que data de principios del siglo XIX y esta se refiere al estudio del efecto climático de las zonas urbanas y la aplicación de los conocimientos adquiridos para una mejor planificación y diseño de las ciudades, esta incorpora aspectos de muchas disciplinas diferentes, como la meteorología, la climatología, la ciencia de la contaminación atmosférica, la arquitectura, la ingeniería de la construcción, el diseño urbano, la biometeorología, entre otras (Jáuregui, 1995). Cada una de estas disciplinas tiene su propio enfoque y ha desarrollado herramientas y métodos (incluyendo vocabulario) apropiados a sus intereses distintivos. Sin embargo gran parte de la base de conocimientos que la climatología urbana aun está fragmentada y todavía está en proceso de ser asimilado en un campo amplio (y coherente) de estudio (Mills, 2013).

A nivel histórico a principios del siglo XX el número de estudios sobre los climas urbanos se amplió respecto al periodo previo. Gran parte de los trabajos durante este período provinieron de la investigación en Europa central y para la década de 1970 el número de investigadores se incrementó y experimentó un avance significativo al adoptar un enfoque cuantitativo y sistemático basado en balances de energía (Mills, 2013). Es en esta época también que se comenzaron a acuñar y asentar varios términos para las diferentes escalas de ambientes urbanizados tales como:

- Capa límite urbana (*urban boundary layer*): es la capa de aire de la atmósfera más próxima a la superficie y por encima de la altura media de los edificios, cuyas características meteorológicas locales están influidas, térmica y dinámicamente, por la superficie urbana. Se trata, fundamentalmente, de una capa de aire turbulento generado por el desplazamiento de este a través de una superficie rugosa y rígida (construcciones) y por la elevación convectiva de las masas de aire (Mills, 2004; Oke, 1976). La Figura 2 esquematiza la situación de la Capa Límite Urbana (CLU) en tres escalas: a) mesoscala, b) escala local y c) microescala. En el nivel de la mesoscala se distinguen las áreas rural, suburbana y urbana, cada una de ellas con distintas intensidades y variabilidad espacio-temporal de la altura de la capa de mezcla. (Palacio y Jiménez, 2012).

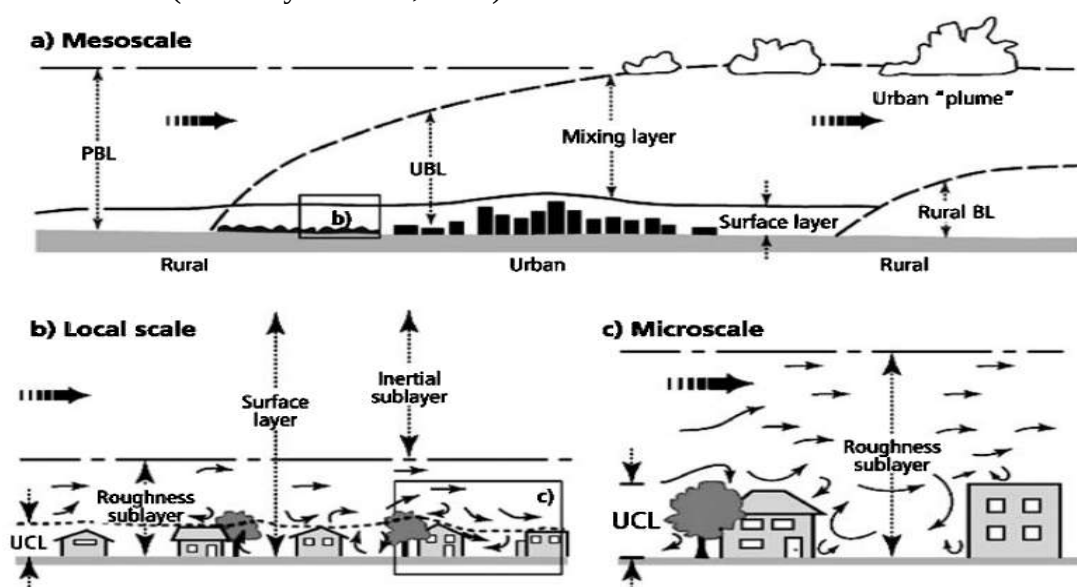


Figura 2. Estructura de la Capa Límite Urbana. Tomado de Grimmond (2006)

- Pajío urbano (*urban canopy layer*): A partir del modelo de Oke (1976), Moreno, (1997) propone la denominación de pajío urbano para designar al conjunto de sectores entre los edificios en los que presentan toda una amalgama de microclimas inferida por las características de los alrededores más inmediatos. Esta capa se extiende desde el suelo hasta aproximadamente el nivel medio de las casas y edificios (como si se tratara de la capa media del dosel de un bosque) (Fig. 3).

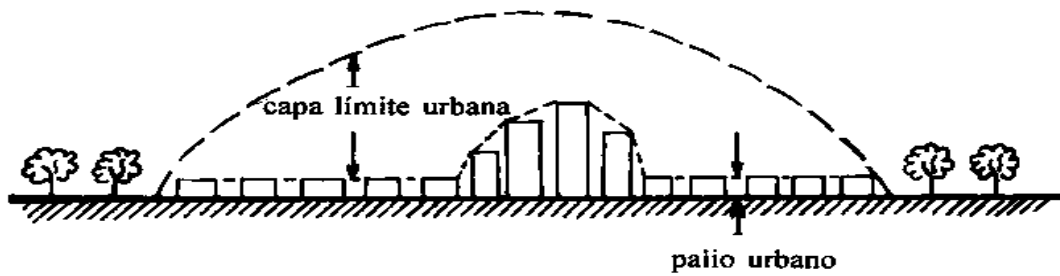


Figura 3. Esquema básico de los sectores con modificación climática urbana en la vertical: la capa límite urbana y el palio urbano. Tomado de Moreno (1999).

- Cañón urbano (*urban canyon*): es la principal unidad del palio urbano, que incluye el suelo (calles empedradas, pavimentadas, etc) entre dos edificios adyacentes, sus paredes y el aire contenido dentro (Moreno, 1997; Nunez y Oke, 1977) (Fig. 4). Es muy similar al cañón geográfico, que designa un valle o una garganta profunda entre dos laderas más o menos altas pero en el caso de las ciudades este está compuesto por largas calles con edificios continuos. Cabe señalar que el cañón urbano como unidad de estudio ya estaba firmemente establecida en los estudiosos de la contaminación del aire como medio de evaluar la exposición de los peatones a los contaminantes vehiculares (Johnson et al., 1973).

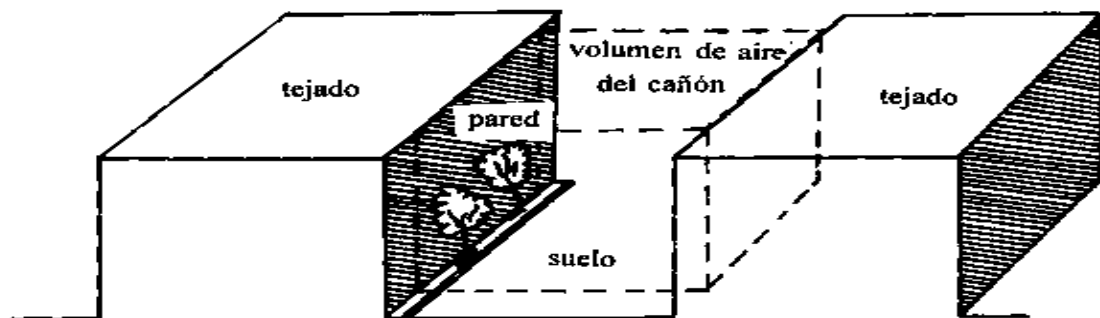


Figura 4. Corte esquemático de un cañón urbano. Tomado de Moreno (1999).

Entre las alteraciones y fenómenos climáticos a escala local que se producen en las ciudades, por las alteraciones en las superficies naturales por efecto de la urbanización destacan:

- Reducción del Factor de visión del cielo (*sky view factor*): El factor de visión del cielo expresa para un punto de observación determinado, la relación entre el área visible de cielo y la porción de bóveda celeste cubierta por los distintos componentes del medio ambiente (topografía, edificios, árboles, luminarias, mobiliario, etc.). El factor de visión de cielo o SVF (*sky view factor*) por sus siglas en inglés, es un parámetro adimensional que toma valor entre 0 y 1. Se aproximará a la unidad en un terreno abierto y plano (Correa et al., 2010). En el entorno urbano se puede definir como la porción de cielo visible que se puede observar desde una calle. Cuando se puede observar todo el cielo se tiene un SVF de 1 y la pérdida de calor desde el suelo será más importante y habrá un enfriamiento mucho más importante durante la noche. Los puntos de la ciudad con SVF cercanos a 1 tendrán temperaturas más bajas que los lugares con SVF más bajo. El factor de visión del cielo en el ámbito urbano en general alcanza valores pequeños, por las

características geométricas de las calles, edificios y los numerosos obstáculos existentes hacen que los ángulos de emisión de la radiación de onda larga nocturna a la atmósfera sean más reducidos que en el campo abierto o el medio rural, donde existen menos obstrucciones y por tanto hay mayor superficie libre de cielo a la que pueda ser devuelta, sin ningún impedimento (mayor irradiación)(Moreno, 1997) (Fig. 5).

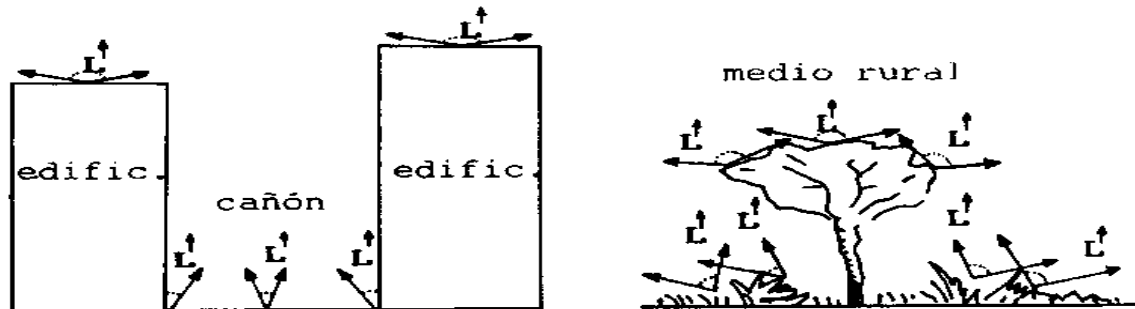


Figura 5. Esquema de las diferencias en la emisión de radiación de onda larga entre la ciudad y el medio rural por causa del distinto factor de visión del cielo entre estas coberturas (Moreno, 1997)

- Isla de calor urbana (*Urban Heat Island*): El efecto conocido como isla de calor urbana (ICU) produce mayores temperaturas del aire en el centro de las ciudades comparado con sus áreas suburbanas y rurales circundantes. Este fenómeno se relaciona principalmente con la alta densidad de urbanización, la alta absorción de los materiales presentes en la ciudad, la escasez de espacios verdes, las características morfológicas de los cañones urbanos, y el calor antropogénico liberado (Alchapar et al., 2012; Oke et al., 1991). Este es uno de los efectos mas ampliamente estudiados y conocidos, y es el tema central de este estudio, en los capítulos siguientes se abordará con mayor profundidad este fenómeno (véase apartado 2).
- Brisa urbana (*Urban-Breeze*): La circulación de la brisa urbana es una respuesta a nivel mesoescala de la atmósfera a las variaciones horizontales de la temperatura asociadas a condiciones de sequedad y a la presencia de la isla de calor urbana. Debido al gradiente de presión horizontal (ascenso del aire caliente en el interior de la ciudad) inducido térmicamente por la isla de calor urbana, provoca una situación de bajas presiones que atraen las masas de aire frío que convergen desde la periferia hasta el interior de la ciudad. Como resultado de esto una circulación local comienza, con aire más frío moviéndose del entorno rural al centro de la ciudad (Hidalgo et al., 2010)(Fig. 6). Este fenómeno fue reportado por primera vez por Dirks, (1978) utilizando datos de velocidad del aire del Metropolitan Meteorological Experiment (METROMEX) en St. Louis, Missouri.

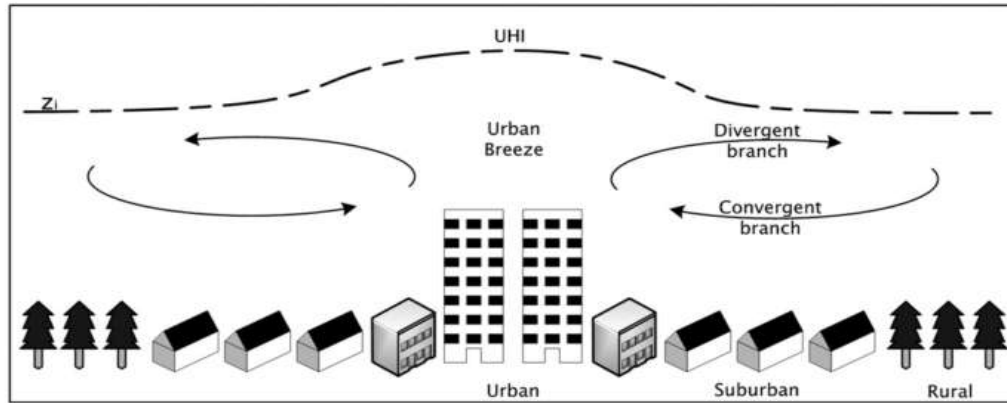


Figura 6. Esquema de la circulación de la brisa urbana provocada por la isla de calor. Tomado de (Hidalgo et al., 2010).

- Isla de sequedad (*dry island*): De un modo análogo al de isla de calor, en inglés se ha utilizado también la denominación de *dry island* para designar aquel sector urbano con humedad relativa más baja que los alrededores. Por término medio, la humedad relativa en las ciudades se reduce aproximadamente en un 5%, pero en noches despejadas y en calma puede llegar a entre 20 y 30%. En esta disminución se estima que juegan un papel importante la isla de calor y también la baja evapotranspiración. Al igual que ocurre con la temperatura, la representación gráfica de la distribución espacial de los valores de la humedad relativa en una ciudad mediante un mapa de isolíneas revelaría una disposición muy similar, marcando claramente una isla central con valores más bajos de humedad relativa, aproximadamente coincidente con el núcleo de la isla de calor (Moreno, 1997).

El estudio denominado METROMEX (*Metropolitan Meteorological Experiment*) también surge en esta época (1973) siendo una de la investigaciones más representativas en torno a la precipitación y clima urbano (Lowry, 1973).

En los últimos años se ha adoptado un nuevo enfoque para el estudio del clima urbano basado en el balance de energía superficial (Mills, 2013) la expresión más ampliamente utilizada con este enfoque es la siguiente:

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G$$

Donde: Q^* = Radiación neta, Q_H = Flujos de calor sensible, Q_E = flujo de calor latente y Q_G = flujo de calor en la superficie.

Mills (2013) hace un resumen del desarrollo de esta ciencia y la separa en dos fases principales a partir de 1900 (Cuadro 2). La primera fase antes de la década de 1970 donde la mayoría de la investigación fue dominada por la *climatología descriptiva* y se basó en la observación de algunos componentes del clima, especialmente la temperatura y humedad del aire. En el segundo período se hizo énfasis en la *climatología física* y en los principios de conservación de la energía. Sin embargo esto no quiere decir que las investigaciones basadas en la climatología descriptiva no se sigan realizando. Por ejemplo, los estudios de islas de calor urbanas probablemente todavía representen la mayor parte de los estudios del clima urbano realizados actualmente.

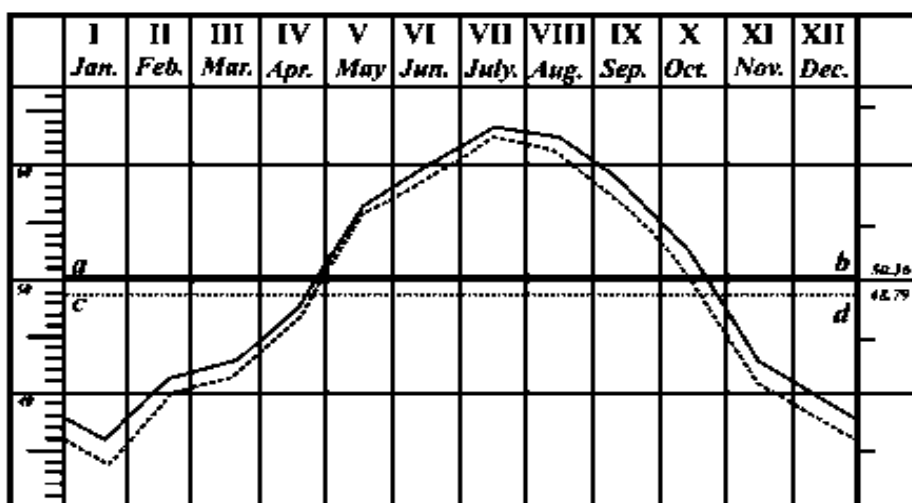
Cuadro 2. Enfoques para el estudio de los efectos del clima urbano.

PERIODO	ENFOQUE
1900	Observación y descripción de efectos urbanos utilizando equipos convencionales de meteorológica (termómetros, higrómetros, etc.).
1960	Avances hacia la medición de las variables en proceso (radiación), intercambios de calor sensible y latente. El uso de métodos estadísticos para resumir y generalizar resultados.
1970	Aplicación de una convencional micro-teoría meteorológica a climas urbanos. Uso del consumo de energía como un marco para explicar el efecto urbano. La observación de las variables que intervienen en el proceso del clima urbano: la radiación y flujos estimados. El uso de técnicas de modelado por computadora. Una definición más rigurosa de superficie urbana, escalas urbanas y efectos urbanos.
1980	La adopción de un enfoque experimental: Selección de formas urbanas comunes (las calles se convierten en cañones). El uso de modelos físicos a escala y la medición directa de flujos de energía.
1990	Relación entre las formas urbanas reales y el efecto climático. Investigaciones de campo en zonas urbanas examinadas por los equipos de investigación.
2000	Desarrollo de modelos climáticos urbanos realistas. Empleo de técnicas novedosas para el análisis del clima urbano.

5. ANTECEDENTES GENERALES

5.1 FENÓMENO DE ISLA DE CALOR URBANA (ICU)

Para el estudio de las particularidades del clima urbano se ha desarrollado el campo de la climatología urbana con un enfoque multidisciplinario el cual se ha centrado en la observación, modelado, y la comprensión de los efectos urbanos sobre el clima (Arnfield, 2003; Landsberg, 1981a; Mills, 2013). Dentro de las particularidades del clima urbano las modificaciones térmicas en las ciudades han sido las más conocidas y las más “sentidas” o “percibidas” por los propios ciudadanos. Howard (1818) mantuvo una estación meteorológica a las afueras de Londres y otra dentro de la ciudad durante 26 años, registrando diariamente la temperatura del aire, la presión atmosférica, la precipitación, etc. El producto de su trabajo fue “THE CLIMATE OF LONDON”, publicado en tres volúmenes en 1833. En este trabajo Howard logró identificar diferencias entre las temperaturas de la zona rural y la urbana y reportó que las temperaturas del aire eran frecuentemente más altas en la ciudad de Londres con respecto a las de sus alrededores no urbanizados (Figura 7) y lo denominó como un “*artificial excess of heat*” de la ciudad (2.1 °C mas caliente en la ciudad durante la noche y 0.19°C durante el día) (Howard, 1818).



La Figura 7. muestra la comparación entre la temperatura media mensual entre Londres (línea continua) y sus alrededores (línea punteada) (basado en el período 1931-1960) (Howard, 1818).

Para describir este fenómeno aparece el término “isla de calor urbana” (“urban heat island”) por vez primera en 1958, cuando el climatólogo inglés Gordon Manley relaciona la reducción de las precipitaciones de nieve en las ciudades inglesas con el aumento de las temperaturas en los ámbitos urbanos (Landsberg, 1981a).

La isla de calor urbana (ICU) es uno de los fenómenos más minuciosamente investigados de la modificación climática dentro de zonas urbanas (Landsberg, 1981; Oke, 1987; Yague et al., 1991; López et al., 1993; Moreno-García, 1994) y se define como el exceso de temperatura frecuentemente observada en las zonas urbanas en comparación con el área circundante (EPA, 2012; Johnson et al., 2005; Oke, 1973, 1976; Santamouris, 2015).

5.1.1 CARACTERÍSTICAS Y TIPOS DE LA ISLA DE CALOR URBANA

Muchas áreas urbanas y suburbanas experimentan temperaturas elevadas en comparación con sus entornos rurales; esta diferencia de temperatura constituye una isla de calor urbana (ICU). La temperatura media anual del aire de una ciudad con un millón o más de habitantes puede ser entre 1°C y 3°C más caliente que su entorno y en una noche clara y tranquila, esta diferencia de temperatura puede ser tanto como 12°C (EPA, 2012; Oke, 2002). Incluso ciudades y pueblos más pequeños producirán las islas de calor, aunque el efecto a menudo disminuye a medida que el tamaño de la ciudad decrece (Oke, 1973, 1982). Algunos autores como (Fabrizi et al., 2010; Mills, 2004; Oke, 1995; Voogt, 2004) han propuesto tres tipos de isla de calor urbana:

- Isla de calor urbana del dosel (ICUd)
- Isla de calor urbana de la capa límite (ICUl)
- Isla de calor urbana de superficial (ICUs)

Estos tres tipos de islas de calor están relacionadas con la escala horizontal a la que el fenómeno es observado y se basan en la escala climática horizontal para las observaciones en sitios urbanos propuesta por Oke (2006) (véase capítulo 1.2 Figura 5). La ICUd y la ICUl se refieren a un calentamiento de la atmósfera urbana (Oke, 1976) mientras que la ICUs se refiere a un calentamiento de la superficie. La capa de dosel urbana es la capa de aire más cercana a la superficie en las ciudades, se extiende desde la superficie hacia arriba hasta aproximadamente la altura media de las edificaciones. Por encima de la capa del dosel se establece la capa límite urbano, que puede ser de 1 km o más de espesor durante el día, la reducción a cientos de metros o menos por la noche (Fabrizi et al., 2010; Oke, 1982).

El ICUd y la ICUl se detectan normalmente con estaciones climáticas terrestres utilizando termómetros o sensores de temperatura para medir la temperatura del aire, mientras que para observar la ICUs se utilizan los sensores térmicos remotos (montados en satélites o aviones) (Roth et al., 1989; Voogt y Oke, 2003)

Sin embargo existen también algunos autores e instituciones como la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA) que solo dividen los tipos de Islas de calor en “*Islas de calor urbana de superficie (ICUs)*” e “*Islas de calor atmosféricas (ICUa)*” para simplificar su estudio (EPA, 2012; Voogt y Oke, 2003).

Estos dos tipos de islas de calor se diferencian por la escala vertical a la que se forman, las técnicas utilizadas para identificar y medir sus impactos, y hasta cierto punto, los métodos disponibles para mitigarlos (Figura 8). Por ejemplo, las islas de calor atmosféricas se manifiestan mejor bajo condiciones de viento calmas y despejadas, sobre todo por la noche cuando las diferencias de enfriamiento se maximizan entre localidades urbanas y rurales circundantes.

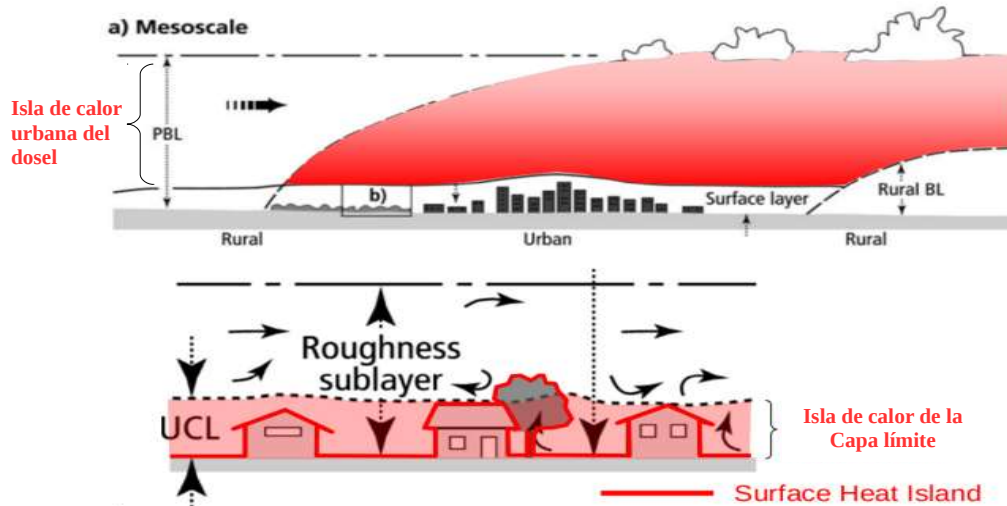


Figura 8. Tipos de isla de calor. Modificado de Oke (2006).

En el cuadro 3 se describen la principales características de la ICU urbana relacionadas con la forma y su comportamiento a través del tiempo:

Cuadro 3. Características básicas de la Isla de calor urbana. Modificado de EPA (2012).

CARACTERÍSTICAS	ICU DE SUPERFICIE	ICU ATMOSFÉRICA
Desarrollo temporal	-Presente en todo momento del día y de la noche. -Mayor presencia durante el día y en el verano, cuando el fuerte calentamiento solar puede llevar a mayores diferencias de temperatura entre las superficies secas y expuestas y aquellas mojadas, sombreadas o con vegetación (EPA, 2012; Voogt, 2004; Voogt y Oke, 2003).	-Puede ser pequeña (en intensidad) durante el día, pero alzarse a cientos de metros y extenderse (en dirección del viento) varios kilómetros (Oke, 2002). -Más intensa por la noche y antes del amanecer y en el invierno (Mills, 2004).
Desarrollo espacial	-La Superficie de estas concuerda con el límite físico de las edificaciones. -Los espacios sombreados entre edificaciones pueden tener temperaturas mucho menores.	-Los patrones espaciales de la temperatura del aire se representan con isotermas las cuales concuerdan con la forma y el área de la ICUA (Oke, 2006, 2002). -El aire mas caliente se encuentra regularmente en el centro de la ciudad (Voogt, 2004).
Pico de intensidad	Mayor variación temporal (EPA, 2012): Día: 10 a 15 ° C Noche: 5 a 10 ° C	Menos variación (EPA, 2012; Oke, 1995): Día: 1 a 3 ° C Noche: 7 a 12 ° C
Método de identificación típica	Medición indirecta: -Percepción remota (Rizwan et al., 2008; Voogt y Oke, 2003).	Medición directa: -Estaciones meteorológicas fijas (Grimmond, 2006). -Transectos móviles (Schmidt, 1930).
Descripción típica	-Imagen térmica.	-Mapa de isotermas. -Gráfico de Temperatura.

El cuadro anterior es un esfuerzo para tratar de generalizar las características típicas de las islas de calor, sin embargo, los patrones espacio-temporales de la ICU no siempre son estables ni concuerdan con generalizaciones. Algunos indican que es más intensa en verano y otros en invierno (Christen y Vogt, 2004; Moreno, 1999; Oke, 1973) e incluso otoño (Alonso et al., 2003). También existen autores que señalan bi-estacionalidad de la máxima intensidad de la ICU: estaciones de otoño y verano (Yagüe et al. , 1991; Gedzelman et al., 2003) y otoño e invierno (Kim y Baik, 2002).

En cuanto al pico de intensidad varios autores han hecho revisiones a la literatura para comparar diferentes estudios alrededor del mundo encontrando una amplia gama de picos

de intensidad que van desde 0.4 a 12.0 °C (Memon et al., 2009; Oke, 1973; Rizwan et al., 2008; Santamouris, 2015) e inclusive se reportan intensidades negativas pequeñas (-1°C) (Memon et al. 2009) y un poco mas alto (-2°C) (Montavez et al., 2000). A pesar de esto estos autores encontraron que las temperaturas mínimas aumentaron considerablemente.

La configuración espacial que adquiere la ICU no siempre es estable y su variabilidad temporal puede ser muy importante. Estos cambios se relacionan con la dinámica atmosférica regional y condiciones meteorológicas específicas. Esto ha sido demostrado por (Landsberg, 1981b) al relacionar las diferentes formas de la ICUs con los flujos de viento y las condiciones sinópticas (Sarricolea et al., 2008).

Es muy difícil un acuerdo global respecto a la estacionalidad, forma y máxima intensidad de la ICU, y que ella dependerá de las condiciones propias de la localización geográfica del emplazamiento de la ciudad, su entorno y su climatología (Espinoza, 2014), las causas y factores que contribuyen a la formación de la ICU se discuten en el apartado siguiente.

5.1.2 CAUSAS DE LA ISLA DE CALOR URBANA

La isla de calor urbana consistente en el incremento de la temperatura al interior de las ciudades respecto al medio rural. El centro de las ciudades, donde las construcciones y los edificios forman un conjunto más denso y compacto, suele presentar las temperaturas más elevadas. Observando gráficamente la distribución espacial de las temperaturas mediante isotermas, se puede apreciar, como las isotermas presentan una disposición concéntrica alrededor del centro urbano (Oke, 2002). Así pues, se trata de una anomalía térmica positiva en los centros de las ciudades producida por ellas mismas (Serra Pardo, 2007) (Figura 9).

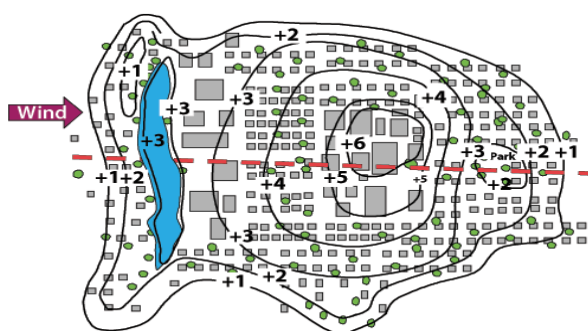


Figura 9. Mapa de isoterma. Se puede apreciar un claro aumento de la temperatura en el centro de la ciudad. Tomado de Voogt (2004).

Las causas que contribuyen a la generación el fenómeno pueden ser varias y tienen un mayor o menor peso dependiendo de la escala a la que el fenómeno se estudie y por ende del tipo de ICU (atmosférica o superficial).

Oke (1995) señala que la ICU es causada por cambios en el balance de energía en conjunción con el desarrollo de la urbanización. El cuadro 4 resume las causas que propician la generación de la isla de calor atmosférica (Isla de calor urbana del dosel e Isla de calor urbana de la capa límite) propuestas por este autor.

Cuadro 4. Causas sugeridas de la formación de las islas de calor urbana de dosel y de capa límite (no están en orden de importancia). Modificado de (Oke 1995).

Anomalías térmicas y alteraciones energéticas	Características de las zonas urbanas que provocan cambios en el equilibrio de la energía
Isla de calor urbana del dosel	
Incremento de la absorción solar	Geometría del Cañón: incremento del área, superficie y reflexión múltiple
Aumento de la radiación de onda larga del cielo	Contaminación del aire: mayor absorción y reemisión de infrarrojos
Decremento neto de radiación de onda larga	Geometría del cañón urbano: Factor de visión del cielo pequeño
Calor antropogénico	Edificios y tráfico: emisiones de calor
Aumento del almacenamiento de calor sensible	Materiales de los Edificios/pavimento y mayor superficie mayor ingreso térmica
Decremento de la evapotranspiración	Materiales de los Edificios/pavimento: superficies impermeables
Decremento total del transporte de aire turbulento	Geometría del Cañón: modificación de los patrones del viento
Isla de calor urbana de la capa límite	
Aumento de la absorción de la radiación de onda corta	Contaminación del aire: incrementa la absorción por los aerosoles y gases
Calor antropogénico	Chimeneas: salida de calor
Aumento del flujo de calor sensible desde abajo	Isla de calor urbana del dosel: mayor flujo de calor desde los techos y cañones urbanos
El aumento de calor sensible desde arriba	Rugosidad de la ciudad, calentamiento de la ciudad: aumento de la inversión térmica

Rizwan et al., (2008) por su parte proponen que la ICU es la respuesta de muchos factores, los cuales pueden ser catalogados como controlables e incontrolables. Las estructuras de la población (densidad de población, extensión urbana, medios de transporte) y del diseño urbano (altura de los edificios, anchos de las calles, áreas verdes y materiales de construcción) pueden ser controlables a través de la planificación ambiental de las ciudades; mientras que las condiciones climáticas y meteorológicas de meso-escala no se pueden controlar. Del mismo modo, las características topográficas e hídricas del sitio tampoco son controlables. No obstante, la aptitud residencial y urbana de una localización puede considerar distancias mínimas a fuentes y corredores de humedad y posición topográfica (Sarricolea et al., 2008) (Figura 10).

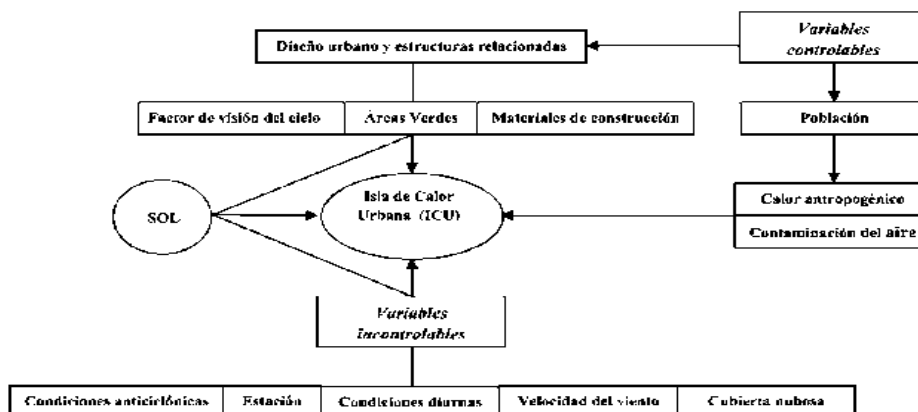


Figura 10. Esquema de variables controlables y no controlables en la generación de la isla de calor urbana, según Rizwan et al. (2008). Tomado de Sarricolea et al. (2008)

El calor contenido y generado en las zonas urbanas proviene del sol en forma de radiación solar y de diversas **fuentes de calor antropogénicas**, como los motores de combustión interna de los automóviles o sistemas de refrigeración de los aires acondicionados. La mayoría de este calor antropogénico es emitido directa e instantáneamente al ambiente. Por otro lado la emisión de calor por radiación solar, es más compleja. Una parte es absorbida por las estructuras urbanas y otra parte es reflejada al medio ambiente. La transferencia de calor y los procesos de conservación de energía, como la conducción, convección, y radiación juegan un rol importante en el balance de calor del entramado urbano. **Las estructuras urbanas:** como fachadas, cubiertas, suelo, zonas verdes, entre otras absorben y almacenan radiación durante el transcurso del día, y esto lo hacen de diferente manera dependiendo de los materiales con los que están constituidas. Al atardecer, el medio ambiente comienza a enfriarse y la energía térmica almacenada en las estructuras es liberada en forma de flujo de calor (Sangines, 2013).

El **factor de visión del cielo y el albedo** son dos factores importantes a considerar en la generación de la ICU. El albedo se define como el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma. El factor de visión del cielo en el ámbito urbano alcanza valores pequeños, debido a las características geométricas de las calles y de los edificios, así como los numerosos obstáculos existentes hacen que los ángulos de emisión de la radiación de onda larga nocturna a la atmósfera sean más reducidos en las zonas urbanas respecto de las zonas rurales, ya que en las zonas rurales existen menos obstrucciones y por lo tanto hay mayor superficie libre de cielo a la que pueda ser devuelta, la radiación sin ningún impedimento y constituye una de las principales causas que contribuyen a la formación del fenómeno de las islas de calor (Moreno, 1997).

El efecto que tiene la **densidad de poblacional** fue analizada por Oke (1973), este desarrollo ecuaciones que relacionan el tamaño de la población con la intensidad de la isla de calor urbana (IICU), sin embargo, estas ecuaciones solo son aplicables para ciudades Norteamericanas y Europeas. Otros autores han analizado este fenómeno bajo este enfoque como Hung et al. (2006), estos analizaron doce ciudades de Asia para correlacionar el número de habitantes con el incremento de la intensidad de la ICU, en Australia un trabajo similar fue realizado por Torok et al. (2001) para cinco ciudades australianas con poblaciones menores a 100 000 habitantes. Para Kim et al. (2004), la densidad de población tiene dos efectos en la generación de la ICU, una directa relacionada con el metabolismo de las personas, ya que a mayor número de personas es mayor el calor emitido por las mismas; y una indirecta, que influye de manera más significativa en el efecto de la ICU, dado que a mayor población se incrementa el número de edificaciones, fabricas y vehículos.

La **falta de vegetación** genera un aumento en el efecto de ICU. Un estudio realizado por Ballinas y Barradas (2016) demostró que el incremento de áreas verdes en la ciudad de México ayudan a la mitigación del fenómeno de ICU.

El **cambio de uso de suelo** asociado a las actividades urbanas modifica el clima urbano a micro-escala y a meso-escala como en Feng et al. (2014), donde el cambio de uso de suelo de rural a urbano causó los mayores valores de IICU. Los procesos a micro-escala presentan perturbaciones atmosféricas debido al planeamiento urbano, por ejemplo la presencia de

calles, edificios y parques. Por otro lado los **procesos a meso-escala** varían de decenas a cientos de kilómetros, en este contexto incluyen las perturbaciones de la superficie urbana en el clima y la velocidad del viento de la región (Sangines, 2013).

La ICU tiene una **variación temporal**, alcanzando su máximo efecto pocas horas después de la puesta del sol (entre 3 y 5 después). Esto es debido a que la energía absorbida por las superficies urbanas es liberada lentamente en comparación con las superficies rurales (Oke, 2002) (Figura 11). En algunas ciudades el menor efecto de la ICU se presenta en las primeras horas de la mañana, incluso presentándose la posibilidad de que las zonas urbanas sean más frescas que las del entorno (cerca del medio día). Este fenómeno es conocido como isla fría y puede ocurrir con diferente frecuencia e intensidad dependiendo de la climatología regional y la configuración geométrica del entorno urbano (Memon et al., 2009; Montavez et al., 2000).

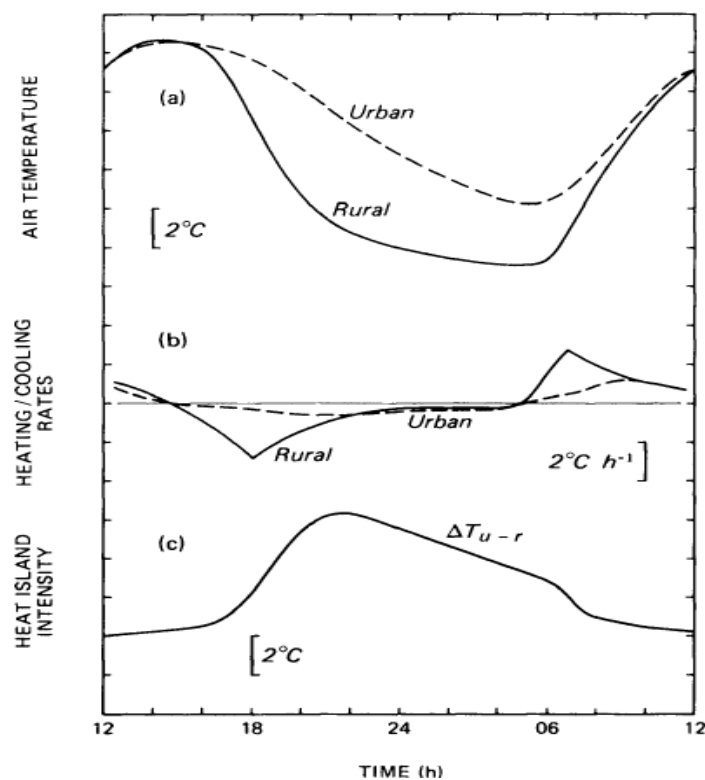


Figura 11. Variación típica temporal de zonas urbanas y rurales (a) la temperatura del aire y (b) las tasas de enfriamiento / calentamiento y (c) la intensidad resultante de isla de calor (diferencia de temperatura entre rural y urbano) en condiciones meteorológicas "ideales" (Oke, 2002).

Serra Pardo (2007) en su estudio de la isla de calor de la ciudad de Ibiza, España; propone que en el centro de las ciudades, donde las construcciones y los edificios forman un conjunto más denso y compacto, suele presentar las temperaturas más elevadas y las causas que contribuyen a que se genere el fenómeno son varias las cuales se resumen en el cuadro 5.

Cuadro 5. Causas de la isla de calor urbana. Elaboración propia a partir de Serra Pardo (2007).

CAUSAS DE LA ISLA DE CALOR URBANA	
Mayor almacenamiento del calor durante el día en la ciudad	Durante el día los materiales de construcción se van calentando progresivamente y durante la noche, se va enfriando, muy lentamente, a diferencia de los suelos rurales o con vegetación, que sufren una rápida pérdida de calor por la irradiación nocturna. Por ello, el aire urbano, en contacto con los materiales de construcción, se enfría lentamente durante la noche. Este diferencia en el enfriamiento explica la mayor intensidad nocturna del fenómeno.
Producción de calor antropogénico	Procedente de las diferentes actividades y procesos de combustión que se llevan a cabo en las áreas urbanas e industriales (calefacción, transporte, alumbrado, industria, etc).
Disminución de la evaporación	Debido a la sustitución de la superficie natural originaria por un suelo pavimentado y sistemas de drenaje urbanos. Esto propicia, que se produzca una rápida escorrentía del agua tras la precipitación, impidiendo la posibilidad de almacenamiento de ésta en el suelo.
Menor pérdida del calor sensible	Debido a la reducción de la velocidad del viento. Los edificios, se convierten en un elemento perturbador de los flujos aéreos. La rugosidad que ofrecen las edificaciones generan una serie de alteraciones en el viento, entre las cuales destaca la reducción de su velocidad, debido a la mayor resistencia a éste que ofrece la presencia de los edificios, que actúan como parapetos.
Aumento de la absorción de radiación solar	Debido al efecto de captura que produce la singular geometría que presentan las calles y los edificios, contribuyen a un albedo relativamente bajo. La radiación solar incidente sufre múltiples reflexiones en las fachadas y en el suelo, quedando atrapada entre las calles.
Disminución de la pérdida de calor durante la noche por irradiación	Debido a las características geométricas de calles y edificios, que reducen el factor de visión del cielo, dando una menor superficie de cielo abierto para la disipación de la irradiación nocturna.
Aumento de la radiación de onda larga absorbida y reemitida hacia el suelo.	La radiación de onda larga es emitida del suelo hacia la atmósfera, ante el obstáculo que representa la presencia de una capa de contaminantes en la atmósfera urbana, una parte de esta radiación es absorbida por dicha capa, que vuelve remitir la radiación hacia el suelo. Esto impide el paso de la radiación de onda larga hacia niveles atmosféricos superiores y su pérdida al espacio (Moreno, 1993 y 1999).

Por último Voogt (2004) enlista varios factores que contribuyen a la ocurrencia e intensidad de las islas de calor. En el cuadro 6 se resumen estos factores.

Cuadro 6. Factores que contribuyen a la formación de la isla de calor urbana

Factores	Efectos en la ICU
Clima	En particular el viento y las nubes, influyen en la formación de islas de calor. Las magnitudes de la isla de calor son mayores bajo condiciones climáticas calmadas y claras. A medida que los vientos aumentan, mezclan el aire y reducen la isla de calor. A medida que las nubes aumentan reducen el enfriamiento nocturno por radiación, y también reducen la isla de calor. Las variaciones estacionales de los patrones climáticos afectan la frecuencia y la magnitud de la isla de calor.
Localización geográfica	Las influencias climáticas regionales o locales, tales como los sistemas locales de vientos, pueden afectar las islas de calor; por ejemplo, las ciudades costeras pueden experimentar un enfriamiento durante el verano cuando las temperaturas de la superficie del océano están más frías que las de la tierra y el viento sopla hacia tierra firme. Donde las ciudades están rodeadas por superficies rurales mojadas, el enfriamiento más lento de estas superficies puede reducir las magnitudes de la isla de calor, especialmente en climas cálidos y húmedos (Oke et al., 1991).
Hora del día y estación	Mayor intensidad por la noches. Las islas de calor de ciudades localizadas en latitudes medias, generalmente son más fuertes en el verano o en el invierno. En climas tropicales, la estación seca puede favorecer grandes magnitudes de las islas de calor.
Forma de la ciudad	Los materiales de construcción son generalmente densos que son lentos en calentarse y enfriarse, y almacenan una cantidad de energía. El reemplazo de las superficies naturales por superficies impermeables, que induce un área urbana más seca, en donde hay menos agua disponible para la evaporación, lo cual contrarresta el calentamiento del aire. Una menor capacidad de las superficies construidas de reverberar la radiación solar; las superficies oscuras, tales como las carreteras de asfalto, absorben más luz solar y se ponen mucho más calientes que las superficies de color claro.
Características de la ciudad	El calor antropogénico, principalmente la combustión de combustibles fósiles, puede ser importante para la formación de islas de calor. El calentamiento antropogénico generalmente tiene mayor impacto durante la estación de invierno de los climas fríos, en el centro de la ciudad. En casos selectos, ciudades construidas en forma muy densa pueden presentar calentamiento antropogénico severo durante la época de verano, como consecuencia de un alto uso de energía para enfriar las edificaciones (Taha, 1997).

6. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con Barrandas (2013) Las islas de calor tienen impactos negativos sobre las poblaciones urbanas, principalmente, afectan el bienestar de las personas, en el confort y la salud creando condiciones sociales y económicas poco favorables. De manera que la urbanización afecta la demanda de agua y energía (Voogt, 2004), el aumento de las temperaturas resulta clave en la aparición de muchas enfermedades infecciosas (Córdova, 2012; Díez, 1996). Las plantas y animales expuestos a la ICU también se ven afectados afectando sus ciclos de crecimiento y reproducción en el caso de las plantas y en el caso de los animales afectando su distribución (EPA, 2016; Yow, 2007). La ICU puede influir en las nubosidad y precipitaciones sobre las ciudades y puede afectar a los procesos a gran escala como el cambio climático. Incluso la investigación climática no es inmune a los efectos de la ICU teniendo esta como consecuencia, la introducción de un sesgo en las mediciones de temperatura, aumentando de manera artificial las temperaturas de las estaciones climáticas cercanas a los núcleos urbanos (Yow, 2007).

En la ciudad de Morelia y en general en el estado de Michoacán, existen muy pocos estudios de climatología urbana. Actualmente solo existe una tesis de licenciatura sobre este tema propuesta por (Guzman, 2015), en la cual se estudió el aumento histórico de las temperaturas al interior de la ciudad utilizando datos de temperatura promedio mensual provistas por el servicio meteorológico nacional. Sin embargo se desconoce como es el desarrollo y evolución del fenómeno de isla de calor a escalas temporales con mayor resolución. Por otro lado tampoco existen estudios aplicados de teledetección térmica infrarroja satelital en la zona de estudio para poder validar la variación espacial del fenómeno.

7. OBJETIVOS

Por lo tanto el objetivo general del trabajo es:

Describir la variación espacio-temporal y la máxima intensidad de la isla de calor urbana de la ciudad de Morelia. Mediante observaciones de temperatura en campo a escala horaria e imágenes satelitales térmicas mensuales durante e un año.

Los objetivos específicos son:

- 1.- Registrar y analizar la variación espacio-temporal de la temperatura de superficie de la Ciudad de Morelia empleando estaciones termométricas y explorar la posibilidad de detectar la isla de calor urbana durante la época lluviosa.
- 2.- Analizar la variación espacio-temporal de la temperatura de superficie de la ciudad de Morelia, a lo largo de un ciclo anual (Junio 2015 - Mayo 2016) empleando imágenes mensuales de percepción remota (Landsat 8).
- 3.- Comparar entre la temperatura superficial diurna calculada empleando la información satelital y la temperatura ambiente registrada por las estaciones termométricas, y segundo realizar un análisis anual de la temperatura ambiente a partir de la información de las estaciones termométricas.

A partir de los resultados obtenidos del presente trabajo se pretende proponer estrategias de mitigación de la isla de calor, para que estas puedan ser consideradas, en las políticas públicas de planificación urbana.

8. HIPÓTESIS

Las hipótesis propuestas son las siguientes:

H1: Existe una variación espacio-temporal de la temperatura de la ciudad de Morelia, de forma que se puede detectar una isla de calor entre el interior urbano.

H2: Esta isla de calor puede detectarse empleando sensores termométricos distribuidos en los distintos usos de suelo de la ciudad. Se espera un gradiente en el que la zona urbana tenga mayor temperatura que la suburbana y ambas mayor temperatura que los terrenos baldíos, áreas verdes y las zonas rurales.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Alchapar, N.L., Correa, E.N., Cantón, M.A., 2012. Índice De Reflectancia Solar De Revestimientos Verticales: Potencial Para La Mitigación De La Isla De Calor Urbana. *Ambient. Construído* 12, 107–123. doi:10.1590/S1678-86212012000300008
- Arnfield, A.J., 2003. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.* 23, 1–26. doi:10.1002/joc.859
- Ballinas, M., Barradas, V.L., 2016. The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. *J. Environ. Qual.* 45, 157. doi:10.2134/jeq2015.01.0056
- Barrandas, V., 2013. La isla de calor urbana y la vegetación arbórea. *Oikos* 7, 16–19.
- Bettencourt, L., West, G., 2010. A Unified Theory of Urban Living. *Nature* 465, 912–913.
- Christen, A., Vogt, R., 2004. Energy and radiation balance of a central European City. *Int. J. Climatol.* 24, 1395–1421. doi:10.1002/joc.1074
- Córdova, K., 2012. Geotecnología espacial aplicada al estudio del fenómeno de islas térmicas urbanas.
- Correa, E.N., Ruiz, M.A., Cantón, M.A., 2010. Morfología forestal y confort térmico en “ciudades oasis” de zonas áridas. *Ambient. Construído* 10, 119–137. doi:10.1590/S1678-86212010000400009
- Díez, F.B., 1996. Meteorología y salud. La relación entre la temperatura ambiental y la mortalidad. *Rev Esp Salud Pública* 70, 251–259.
- Dirks, A., 1978. Mesoscale perturbations on airflow in the urban mixing layer.pdf. *AMS Journals Online* 17, 677–688.
- EPA, 2016. Heat Island Impacts [WWW Document]. URL <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-impacts#health> (consultado 1.3.17).
- EPA, 2012. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics. United States Environmental Protection Agency.
- Espinoza, S., 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 1.
- Fabrizi, R., Bonafoni, S., Biondi, R., 2010. Satellite and ground-based sensors for the Urban Heat Island analysis in the city of Madrid. *Remote Sens.* 2, 1400–1415. doi:10.3390/rs2051400

- Feng, H., Zhao, X., Chen, F., Wu, L., 2014. Using land use change trajectories to quantify the effects of urbanization on urban heat island. *Adv. Sp. Res.* 53, 463–473. doi:10.1016/j.asr.2013.11.028
- Grimmond, C.S.B., 2006. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. *Theor. Appl. Climatol.* doi:10.1007/s00704-005-0140-5
- Guzman, P., 2015. Análisis climático y uso de suelo para la evaluación de isla de calor en la ciudad de morelia michoacán.
- Habitat, 2012. State of the World's Cities 2010/2011.
- Hebbert, M., 2014. Climatology for city planning in historical perspective. *Urban Clim.* 10, 204–215. doi:10.1016/j.uclim.2014.07.001
- Hidalgo, J., Masson, V., Gimeno, L., 2010. Scaling the daytime urban heat island and urban-breeze circulation. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 49, 889–901. doi:10.1175/2009JAMC2195.1
- Howard, L., 1818. THE CLIMATE OF LONDON 285.
- Jáuregui, E., 1995. Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la ciudad de México debidas a la urbanización.pdf. *Investig. Geográficas, Boletín del Inst. Geogr. UNAM* 31.
- Johnson, D.O., Arriaga, F.J., Lowery, B., 2005. Automation of a falling head permeameter for rapid determination of hydraulic conductivity of multiple samples. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 828–833. doi:10.2136/sssaj2004.0014N
- Johnson, W.B., Ludwig, F.L., Dabberdt, W.F., Allen, R.J., 1973. An Urban Diffusion Simulation Model For Carbon Monoxide. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 23, 490–498. doi:10.1080/00022470.1973.10469794
- Kremser, V., 1866. Vortrag uber das Klima von Berlin. *Festschrift d. 59 Vers. d.d. Naturf. und Artze* 37–38.
- Landsberg, H.E., 1981a. *The Urban Climate.* Academic Press.
- Landsberg, H.E., 1981b. *The Urban Climate.*
- Lowry, W.P., 1973. FOR METROMEX.
- Memon, R.A., Leung, D.Y.C., Liu, C.H., 2009. An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmos. Res.* 94, 491–500. doi:10.1016/j.atmosres.2009.07.006
- Mills, G., 2013. Urban climatology: History, status and prospects. *Urban Clim.* 10, 479–489. doi:10.1016/j.uclim.2014.06.004
- Mills, G., 2004. The Urban Canopy Layer Heat Island IAUC Teaching Resources, en:

- International Association for Urban Climate. pp. 1–5.
- Montavez, J.P., Rodríguez, A., Jiménez, J., 2000. A study of the urban heat island of Granada. *Int. J. Climatol.* 20, 899–911.
- Moreno, M. del C., 1999. *Climatología Urbana*. Edicions Universitat de Barcelona.
- Moreno, M.C., 1997. Una propuesta de terminología castellana en Climatología urbana. *Investig. Geográficas* 17, 89–97.
- Nunez, M., Oke, T.R., 1977. The Energy Balance of an Urban Canyon. *J. Appl. Meteorol.* doi:10.1175/1520-0450(1977)016<0011:TEBOAU>2.0.CO;2
- Oke, T., 1973. City size and the urban heat island. *Atmos. Environ.* Pergamon Press 7, 769–779. doi:10.1016/0004-6981(73)90140-6
- Oke, T.R., 2006. Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites, en: World Meteorological Organization. doi:Reporte
- Oke, T.R., 2002. *Boundary Layer Climates*, Second edi. ed. Taylor & Francis Group.
- Oke, T.R., 1995. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. *Wind Clim. cities* 81–107. doi:10.1007/978-94-017-3686-2
- Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 108, 1–24. doi:10.1002/qj.49710845502
- Oke, T.R., 1976. The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. *Atmosphere (Basel)*. 14, 268–277. doi:10.1080/00046973.1976.9648422
- 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 Meteorol.* 56, 339–358. doi:10.1007/BF00119211
- ONU, 2014a. *World Urbanization Prospects, the 2014 Revision*. doi:10.4054/DemRes.2005.12.9
- ONU, 2014b. *La situación demográfica en el mundo 2014*.
- Palacio, C.A., Jiménez, J.F., 2012. *Climatología urbana y de montañas*. Dyna-Colombia 79, 61–69.
- Renou, E., 1868. Differences de temperature entre la ville et la campagne. *Ann. Soc. Meteor Fr.* 83–97.
- Rizwan, A.M., Dennis, L.Y.C., Liu, C., 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *J. Environ. Sci.* 20, 120–128. doi:10.1016/S1001-0742(08)60019-4
- Roth, M., Oke, T.R., Emery, W.J., 1989. Satellite-derived urban heat islands from three

- coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *Int. J. Remote Sens.* 10, 1699–1720. doi:10.1080/01431168908904002
- Sangines, E.D., 2013. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA Y SU UTILIZACIÓN PARA IDENTIFICAR PROBLEMÁTICAS ENERGÉTICAS Y DE PLANIFICACIÓN URBANA.
- Santamouris, M., 2015. Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Sci. Total Environ.* 512–513, 582–598. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.01.060
- 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. *Rev. Climatol.* 8, 71–84.
- Schmidt, W., 1930. Kleinklimatische Aufnahmen durch Temperaturfahrten. *Meteorol.* 47, 92–106.
- Serra Pardo, J.A., 2007. Estudio de la isla de calor de la ciudad de Ibiza. *Investig. Geográficas* 44, 55–73.
- Taha, H., 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy Build.* 25, 99–103. doi:10.1016/S0378-7788(96)00999-1
- Torok, S.J., Morris, C.J.G., Skinner, C., Plummer, N., 2001. Urban heat island features of southeast Australian Towns. *Aust. Meteorological Mag.* 50, 1–13.
- UNFPA, 2007. Estado de la población mundial 2007, en: Fondo de Población de las Naciones Unidas.
- UNFPA, 1996. Estado de la población mundial 1996.
- Voogt, J.A., 2004. Urban Heat Islands: Hotter Cities [WWW Document]. *Action Biosci.* URL <http://www.actionbioscience.org/environment/voogt.html>
- Voogt, J. a., Oke, T.R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens. Environ.* 86, 370–384. doi:10.1016/S0034-4257(03)00079-8
- Wittwer, W.C., 1960. Grundzuge der Klimatologie von Bayern. *Landes-und Volkskd. d. Kgr. Bayern* 1.
- Yow, D.M., 2007. Urban Heat Islands : Observations , Impacts , and Adaptation. *Geogr. Compass* 6, 1227–1251.

10. RESULTADOS

10.1 VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE ISLA DE CALOR E ISLA FRÍA SUPERFICIAL DIURNA EN MORELIA MICHOACÁN.

RESUMEN

Actualmente el 54% de la población vive en zonas urbanas que presentan características y fenómenos climáticos particulares, como la isla de calor urbana (ICU). Esta se define como el aumento en la temperatura de las zonas urbanas respecto al área circundante. Sin embargo las diferencias en el balance energético de radiación solar incidente, sobre las superficies urbanas y sus alrededores, dan lugar a fenómenos de calentamiento y enfriamiento, tales como islas de calor superficial (ICS) e islas frías superficiales (IFS). Se estudió la presencia e intensidad de la ICS e IFS mediante 12 imágenes satelitales térmicas (Landsat 8) mensuales en la Ciudad de Morelia, Michoacán. Se realizó una clasificación de uso de suelo (urbano, suburbano, rural, áreas verdes, terrenos baldíos) y se comparó la temperatura superficial entre estas coberturas. La ciudad presentó una ICS en los meses de junio a diciembre con una intensidad máxima de 7.2°C en el mes de septiembre y una IFS de enero a mayo siendo este último el de mayor intensidad (2.5°C). Los análisis de varianza y pruebas de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) realizadas en todas las fechas, mostraron que existen diferencias significativas entre los usos de suelo, a excepción del mes de diciembre donde los usos de suelo urbano y suburbano no mostraron diferencias ($F=10209$, $gl=4$, $p<0.001$) y marzo donde el uso de suelo urbano y terrenos baldíos no mostraron diferencias ($F=5595$, $gl=4$, $p<0.001$). Se discute la carencia de áreas verdes al interior de la ciudad como fuente de calor que puede favorecer la formación de isla de calor urbana diurna, así como puntos clave de las posibles estrategias de mitigación de la ICU en la ciudad de Morelia y ciudades con características similares.

Palabras Clave: clima urbano, análisis térmico, imágenes Landsat.

INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del proceso de urbanización generalizado ocurrido en el transcurso del pasado y el presente siglo se ha ido despertando un creciente interés por el estudio del medio físico de las ciudades y, particularmente, por el del clima urbano (Moreno, 1999). Una planeación urbana deficiente ha provocado que el espacio que ocupan los asentamientos urbanos incremente con mayor rapidez que la propia población y se prevé que entre el 2000 y 2030, la población urbana del mundo aumente un 72%, mientras que la superficie de las zonas edificadas donde viven 100,000 o más personas podría aumentar en un 175% (UNFPA, 2007). Este proceso de expansión urbana desmesurada da lugar a cambios radicales en las superficies naturales, tales como aumento de las superficies impermeables, cambios en la rugosidad superficial, pérdidas de áreas verdes y evapotranspiración. Que por lo general, se traducen en el aumento temperatura al interior de las ciudades en climas templados, subtropicales y fríos; dando lugar a un fenómeno conocido como isla de calor urbano (ICU) (Farina, 2012; Li et al., 2012; Oke, 1982). Sin

embargo, en algunas ciudades en regiones semi-áridas se ha reportado la ocurrencia de un fenómeno inverso denominado *isla fría* en donde la temperatura de las ciudades es menor comparada con los alrededores no urbanizados (Frey et al., 2006a; Rasul et al., 2015).

El calentamiento de los centros urbanos tiene repercusiones negativas, tales como el deterioro de la calidad de vida de las personas (disconfort térmico) debido a altas temperaturas (Krüger et al., 2013), el aumento del consumo de energía (Santamouris, 2014), el aumento de las tasas de mortalidad (Tan et al., 2010), además de tener también efectos sobre los ciclos de crecimiento y reproducción de las plantas de la planta, en los animales afecta tanto su distribución, así como un aumento en el número de patógenos que afectan tanto a plantas, animales y el hombre (EPA, 2016; Yow, 2007).

Algunos autores como Fabrizi et. al. (2010), Mills (2004), Oke, (1995) y Voogt, (2004) han propuesto tres tipos de isla de calor urbana: Isla de calor urbana del dosel (ICU_D), Isla de calor urbana de la capa límite (ICU_L) y la Isla de calor urbana de superficial (ICU_S) y están relacionadas con la escala horizontal a la que el fenómeno es observado y se basan en la escala climática horizontal para las observaciones en sitios urbanos propuesta por Oke (2006).

La ICU_D y la ICU_L se detectan normalmente con estaciones climáticas terrestres utilizando termómetros o sensores de temperatura para medir la temperatura del aire, mientras que para observar la ICU_S se utilizan los sensores térmicos remotos (montados en satélites o aviones) (Roth, 2007; Voogt and Oke, 2003).

Mientras que una de las formas más comunes para obtener información de temperatura superficial para el estudio de ICU_S es mediante la detección de radiación electromagnética (DRA) a través de sensores diseñados para registrar mediciones dentro del rango infrarrojo térmico del espectro electromagnético (de 8 a 15 μm) (Mohamed et al., 2016). Para la adquisición de información térmica de grandes extensiones de la superficie, estos sensores son montados en sobre satélites puestos en órbita alrededor de la tierra, de los cuales se obtienen imágenes satelitales térmicas, como por ejemplo las proporcionadas por la misión Landsat (Srinivasan, 2013; USGS, 2015a).

Por otro lado el índice normalizado de vegetación (NDVI) es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación mediante la medición de la reflexión del infrarrojo cercano en las plantas, por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde una plataforma espacial. El NDVI se ha utilizado para analizar la relación espacial entre la cobertura vegetal y las condiciones térmicas superficiales en relación con las islas de calor superficial (Cui and de Foy, 2012a; Weng et al., 2004). Mostrando en muchos casos una relación negativa entre la temperatura superficial y la vegetación (Weng, 2009).

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la zona urbanizada de la ciudad de Morelia, Michoacán y su entorno rural inmediato tomado a partir de la generación de un buffer de 500 m (Figura 1). La ciudad se encuentra localizada en la región centro-norte del estado de Michoacán. El área metropolitana de Morelia tiene una superficie de 111.4 km² para el año 2010 (INEGI, 2014), con una población de 829,625 (CONAPO, 2016) y densidades de edificación entre 13 y 130 viviendas por hectárea (IMDUM, 2012). La zona urbana de la ciudad de Morelia

se encuentra ubicada entre los paralelos 19.62° y 19.79° de latitud norte y los meridianos -101.33° y 101.07° longitud oeste, con una altitud promedio de 1,940 msnm.

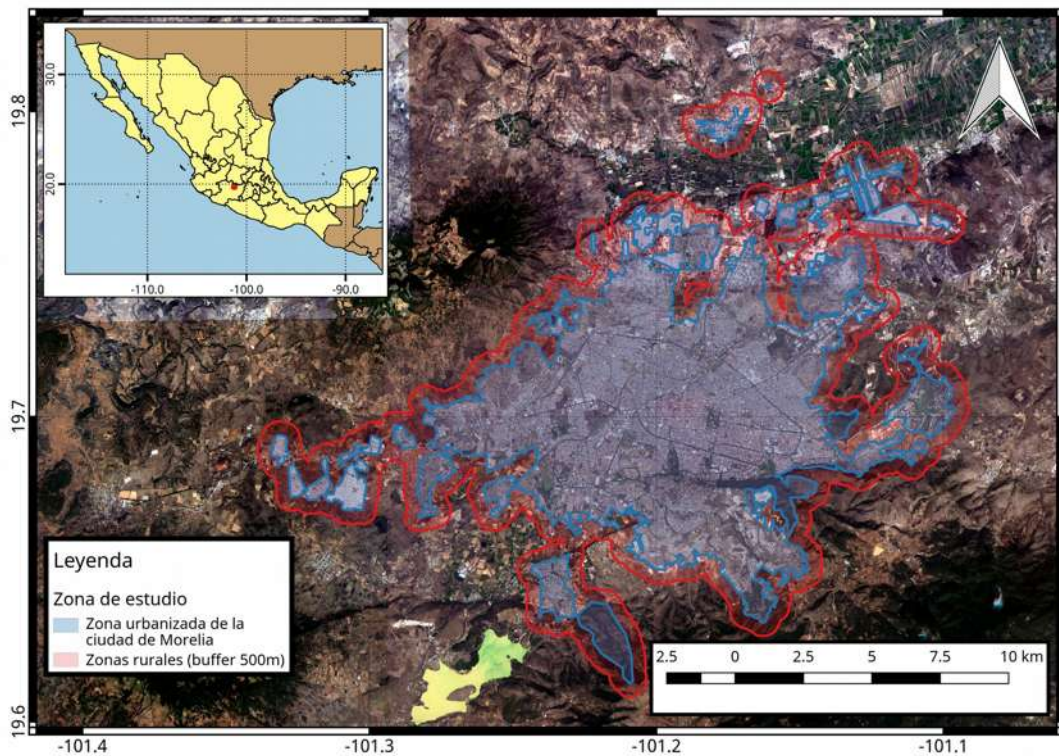


Figura 1. Ubicación del área de estudio sobre imágenes Rapideye del 2013.

El tipo de clima de la zona de acuerdo con la clasificación de Köppen modificado por (García, 1987) es Cb(w1)(w)(i')g; templado con lluvias en verano, con una temperatura promedio anual de 18.9 °C, siendo enero y mayo los meses más fríos y calurosos con temperaturas mensuales promedio de 15.7° y 21.9° C respectivamente. La precipitación promedio anual es de 794.4 mm, con diciembre y julio los meses más secos y lluviosos respectivamente con láminas mensuales promedio de 3.7 mm y 173.7 mm (SMN, 2016).

METODOLOGÍA

Adquisición de escenas

La información de temperatura superficial fue derivada de 12 escenas de la misión Landsat 8, las cuales comprenden un ciclo mensual anual desde el 9 de junio del 2015 al 3 de mayo del 2016. Se buscaron imágenes con menos del 10 % de nubosidad y al menos una por cada mes del año. Las escenas se obtuvieron a través del sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) (Tabla 1).

Se utilizó la banda térmica número 10 en cada una de las imágenes, la cual tiene una resolución espacial de 100 metros, pero son remuestreadas y entregadas a una resolución espacial de 30 metros (USGS, 2016).

Tabla 1. Descripción de las imágenes usadas en el estudio. *Horario de verano.

FECHA	HORA LOCAL	HORA GTM	COBERTURA DE NUBES	PATH/ROW	CALIDAD DE LA IMAGEN
09-jun-15	12:10:56*	17:11:12	< 1%	28/46	9
27-jul-15	12:11:19 *	17:11:34	6 %	28/46	9
05-ags-15	12:05:08*	17:05:24	6 %	27/46	9
22-sep-15	12:05:30 *	17:05:46	4 %	27/46	9
15-oct-15	12:11:42*	17:11:58	> 1%	28/46	9
16-nov-15	11:11:49	17:12:05	> 1%	28/46	9
11-dic-15	11:05:38	17:05:54	> 1%	27/46	9
19-ene-16	11:11:47	17:12:03	> 1%	28/46	9
04-feb-16	11:11:44	17:12:00	> 1%	28/46	9
16-mar-16	11:05:44	17:06:00	9.5 %	27/47	9
08-abr-16	12:11:19 *	17:11:35	> 1%	28/46	9
03-may-16	12:05:09 *	17:05:25	> 1%	27/46	9

Por otro lado la clasificación de uso y cobertura del terreno se hizo mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto QGIS v 2.14.3-Essen y una imagen satelital SPOT 5 del año 2013. La clasificación y de uso y cobertura del terreno se realizó a partir de una adaptación del modelo propuesto por (Oke, 2006) para usos y coberturas de zonas climáticas en las ciudades. Esta clasificación se basa principalmente en la densidad de urbanización y rugosidad de los edificios en unidades territoriales de 1 km², empleando cuatro clases: Urbano (>85% de cobertura edificada), suburbano (entre el 84 y el 40% de cobertura edificada), rural (menos del 39% cobertura edificada) áreas verdes grandes (parques, áreas verdes superiores a 5 ha) y terrenos baldíos (Figura 2).

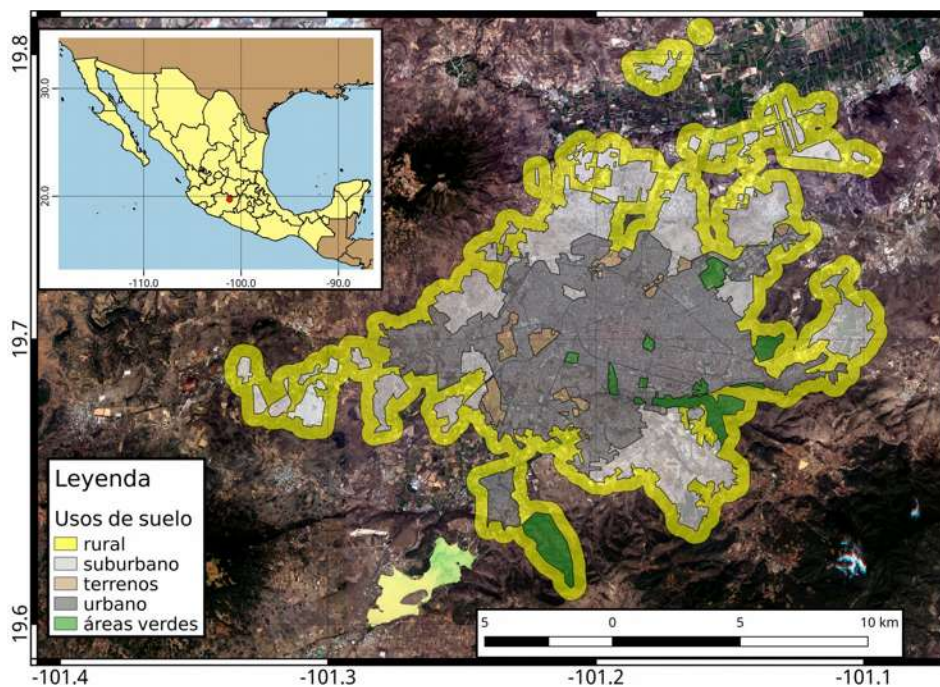


Figura 2. Clasificación de uso de suelo de la ciudad de Morelia.

Preprocesamiento de las imágenes

Antes de hacer el cálculo de temperatura superficial se eliminaron las zonas con nubosidad de la zona de estudio, utilizando como capa de máscara la imagen georreferenciada de calidad Landsat Look de 8 bits (QB. Png), la cual proporciona un raster con la calidad de los píxeles para tener una vista rápida de la calidad de las escenas (USGS, 2015b).

Cálculo de la temperatura superficial

Radiancia espectral en el techo de la atmósfera (top of Atmosphere reflectance) (TOA)

Para el cálculo de la temperatura superficial se realizó la conversión del número digital (ND) de la banda 10 a radiancia espectral en el techo de la atmósfera (TOA) usando la ecuación 1 (USGS, 2015a):

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad \text{Ec. 1}$$

Donde: L_{λ} =Es el valor de radiancia espectral en el techo de la atmosfera (TOA) medida en valores de (Watts /m² * srad * μm), M_L = Es el factor multiplicativo de escalado específico de la banda obtenido del metadato (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda), Q_{cal} = Es el producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada uno de los píxeles de la imagen y A_L = Es el factor aditivo de escalado específico de la banda obtenido del metadato (RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda) para cada una de las escenas.

Temperatura de brillo de satélite

Una vez obtenida la nueva imagen con valores de pixel en radiancia TOA, esta puede ser convertida de radiancia espectral a temperatura de brillo de satélite en grados Kelvin (K) usando para ello las constantes térmicas (K_1 y K_2) suministradas en el archivo de metadatos para cada escena, mediante la ecuación 2 (USGS, 2015^a)

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde: T_B = Temperatura de brillo aparente en grados Kelvin (K), L_{λ} = Corresponde a la reflectancia en el techo de la atmosfera TOA (Watts/(m² * srad* μm)), K_1 = Es la constante de conversión K_1 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato ($K_1_CONSTANT_BAND_x$, donde x es el número de la banda, en este caso la banda 10), K_2 = Es la constante de conversión K_2 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato ($K_2_CONSTANT_BAND_x$, donde x es el número de la banda, banda 10).

Mapa de emisividad

Es necesario para realizar una conversión de la temperatura de brillo de satélite a temperatura superficial, realizar una corrección a partir de la emisividad o emitancia de los diferentes materiales encontrados en la zona de estudio, para derivar con precisión la temperatura de superficie (Rasul et al., 2015) ya que, en los materiales sólidos de la superficie terrestre, una fracción de la energía radiante incidente es reflejada, transmitida o ambas (Artis and Carnahan, 1982).

Se realizó una clasificación supervisada utilizando el algoritmo random Forest (Breiman, 2001) utilizando entre 43 y 55 puntos de control de campo georreferenciados, utilizando el paquete random Forest (Liaw and Wiener, 2015) del lenguaje estadístico R. La clasificación supervisada incluyó 4 clases: suelo desnudo, vegetación, asfalto y construcciones de concreto. Estas clases representan el tipo de materiales con mayor ocurrencia en la superficie de la ciudad. A cada una de estas clases se le asignó un valor de emisividad de acuerdo con los valores propuestos por Mallick et al. (2012). Al suelo desnudo se le asignó un valor de emisividad de 0.928, a las zonas con vegetación se les asignó un valor de 0.982, en el caso del asfalto y del concreto estos tienen valores de 0.942 y 0.937 respectivamente, sin embargo, debido a que la resolución de las imágenes térmicas (30 m) sobrepasa el ancho promedio de las calles asfaltadas de la ciudad, se decidió usar un promedio ponderado único de emisividad para toda la zona urbanizada incluyendo calles, estacionamientos y construcciones de 0.938.

Esta clasificación supervisada se realizó para cada una de las imágenes analizadas ya que las zonas rurales y terrenos baldíos dentro de la ciudad, sufren cambios en sus coberturas debido al ciclo fenológico de las plantas que naturalmente crecen en estas zonas, así como también ocurren cambios en las zonas agrícolas de la periferia de la ciudad relacionado con los ciclos de cultivo en los terrenos de riego y temporal.

Estimación de la temperatura superficial

El cálculo de la temperatura superficial se realizó a partir de la imagen de emisividad y temperatura de brillo de satélite utilizando la ecuación 3 (Artis and Carnahan, 1982; Weng et al., 2004).

$$T_s = \frac{T_B}{1 + (\lambda T_B / \rho) \ln \epsilon} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde: T_s = Temperatura superficial en grados kelvin (K), T_B = Temperatura de brillo aparente en grados Kelvin (K), λ = longitud de onda de radiancia emitida (11.5 μm), ϵ = emisividad y $\rho = h * c / s$ (1.438 * 10⁻² m K) donde: h = constante de planck (Js), c = velocidad de la luz (2.998 * 10⁸ m/s), s = Constante de Boltzmann (1.38 * 10⁻²³ J/K).

El resultado de este procesamiento arroja una imagen de temperatura superficial con una corrección derivada a partir de las imágenes de emisividad.

Cálculo del NDVI

Mediante el NDVI es posible identificar y separar la vegetación verde de otras coberturas debido a que la clorofila de la vegetación verde absorbe luz roja para la fotosíntesis y refleja las longitudes de onda del infrarrojo cercano (NIR) debido a la dispersión causada por la estructura interna de las hojas (Effat and Hassan, 2014). El NDVI se obtuvo para cada una de las doce imágenes utilizando la ecuación 4:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde: NDVI= es el índice de vegetación de diferencia normalizada, R_{NIR} = Reflectancia en el Infrarrojo cercano (0.85 – 0.88 μm), R_{RED} = Reflectancia en el rojo del espectro visible (0.85 – 0.88 μm).

En el caso de Landsat 8 las bandas que corresponden a las longitudes de onda del infrarrojo cercano y el rojo visible corresponden a las bandas 4 y 5 respectivamente (USGS, 2015b). Esta ecuación NDVI produce valores en el rango de -1 a 1, donde los valores positivos indican áreas vegetadas y los valores negativos significan características superficiales no vegetadas tales como agua, suelo desnudo, nubes y nieve (Yuan and Bauer, 2007).

Análisis estadístico

Empleando sobreposición digital de mapas en un sistema de información geográfica (qgis), se extrajeron los datos de temperatura superficial de cada uso de suelo de acuerdo con la clasificación realizada en la figura 2. Se realizó la estadística descriptiva básica (Temperatura máxima, mínima, promedio y desviación estándar) para cada uso de suelo y de la imagen en general. Se calculó también la intensidad de isla de calor urbana promedio en cada una de las fechas ecuación 5:

$$IICU = \bar{T}_U - \bar{T}_R \quad \text{Ec. 5}$$

Donde: la intensidad de isla de calor urbana (IICU) es igual a temperatura urbana promedio menos la temperatura rural promedio.

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) entre los diferentes usos de suelo así como pruebas de Diferencia Honesta Significativa de Tukey (TukeyDHS) (Miller, 1981; Yandell, 1997). Finalmente se realizó una regresión lineal entre el promedio de la temperatura superficial por uso de suelo y el promedio del NDVI por uso de suelo para cada una de las 12 imágenes del periodo de estudio. Se realizó el análisis de correlación (r^2) y se calculó la raíz del error medio cuadrático (RMSE).

RESULTADOS

Mapas térmicos de temperatura

Se generó una imagen térmica de temperatura superficial para cada mes durante un periodo de un año (9 de junio del 2015 al 3 de mayo del 2016). En la figura 3 se puede observar las variaciones de temperatura superficial en la zona de estudio durante un año.

Variación temporal de la temperatura superficial entre usos del suelo

Los análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) realizadas en cada una de las fechas, mostraron que existen diferencias estadísticas significativas entre todos los usos de suelo, prácticamente durante todo el año, con excepción del mes de diciembre en donde los usos de suelo urbano y suburbano no mostraron diferencias estadísticas ($F=10209$, $gl=4$, $p<0.001$) y marzo donde las temperaturas de los usos de los terrenos baldíos y el uso de suelo urbano no mostraron diferencias significativas ($F=5595$, $gl=4$, $p<0.001$) (Tabla 3).

Tabla 3. Temperatura superficial promedio por fecha para los diferentes usos del suelo en la ciudad de Morelia. Entre paréntesis se presenta la desviación estándar. Letras distintas indican diferencia estadística significativa entre usos para cada fecha ($\alpha \leq 0.05$) (TukeyDHS).

Fecha	T. Urbano prom	T. Suburbano prom	T. Rural prom	T. a. Verdes prom	T. Terrenos prom
9-jun-15	37.1 (2.7) ^a	33.8 (3.3) ^b	31.1 (3.4) ^c	27.3 (2.7) ^d	31.7 (2.9) ^e
27-jul-15	29.9 (3.1) ^a	25.8 (3.5) ^b	22.9 (2.8) ^c	21.3 (2.9) ^d	25.1 (2.3) ^e
05-ags-15	31.5 (2.8) ^a	28.0 (3.1) ^b	25.4 (2.7) ^c	23.1 (2.8) ^d	26.4 (2.1) ^e
22-sep-15	34.4 (2.7) ^a	30.8 (3.2) ^b	27.2 (3.2) ^c	23.4 (3.9) ^d	29.2 (2.6) ^e
15-oct-15	30.0 (2.2) ^a	27.9 (3) ^b	25.6 (3.9) ^c	21.7 (3.1) ^d	26.2 (2.6) ^e
16-nov-15	30.5 (1.9) ^a	30.0 (2.5) ^b	28.5 (4) ^c	23.3 (3.5) ^d	27.9 (2.9) ^e
11-dic-15	24.4 (1.8) ^{a*}	24.4 (2.3) ^{a*}	23.4 (3.8) ^b	18.1 (3.7) ^c	22.9 (2.7) ^d
19-ene-16	26.0 (2.2) ^a	27.5 (2.8) ^b	27.5 (4.5) ^c	20.1 (4.1) ^d	26.6 (3.5) ^e
4-feb-16	30.5 (2.3) ^a	32.5 (3.3) ^b	32.7 (5.1) ^c	24.5 (4.3) ^d	31.4 (3.9) ^e
16-mar-16	36.0 (2.3) ^{a*}	35.9 (4.2) ^b	36.8 (5.2) ^c	29.6 (3.8) ^d	36.2 (4.1) ^{a*}
8-abr-16	39.9 (1.9) ^a	41.4 (3.3) ^b	41.7 (5) ^c	34.4 (4) ^d	39.6 (4.3) ^e
3-may-16	45.5 (2.2) ^a	47.0 (3.2) ^b	48.0 (4.9) ^c	40.6 (4.4) ^d	45.0 (4.7) ^e

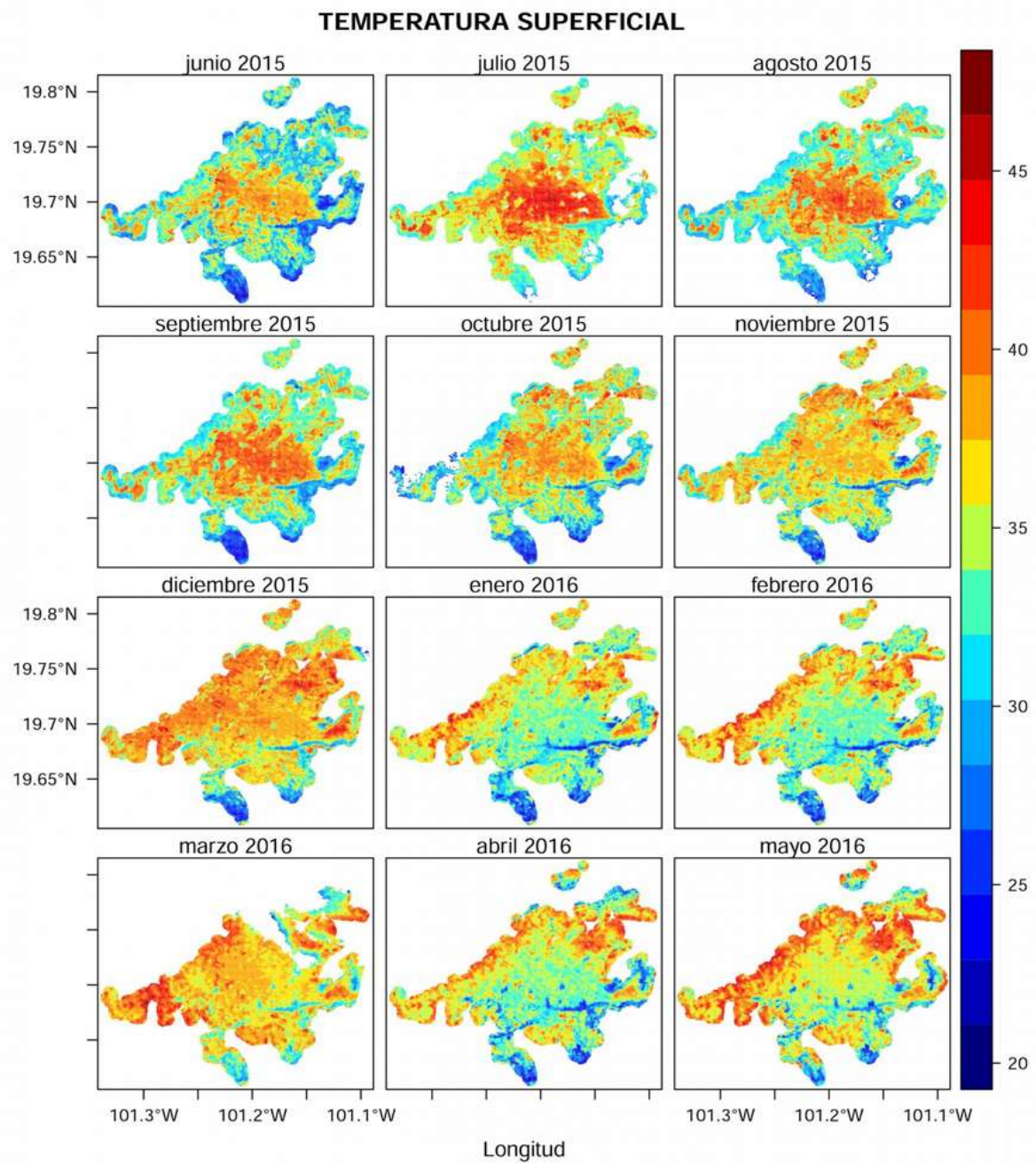


Figura 3. Mapas de temperatura superficial mensual.

Los usos de suelo de la zona de estudio presentan el mismo patrón de temperatura superficial promedio (urbano>suburbano>terrenos>rural>áreas verdes) durante los meses de **junio a octubre**. Presentándose en todos los casos la temperatura superficial mas alta en el mes de **junio** y la mas baja en el mes de **julio**. La temperatura superficial promedio mas baja se presentó en las áreas verdes durante todo el año (Figura 4).

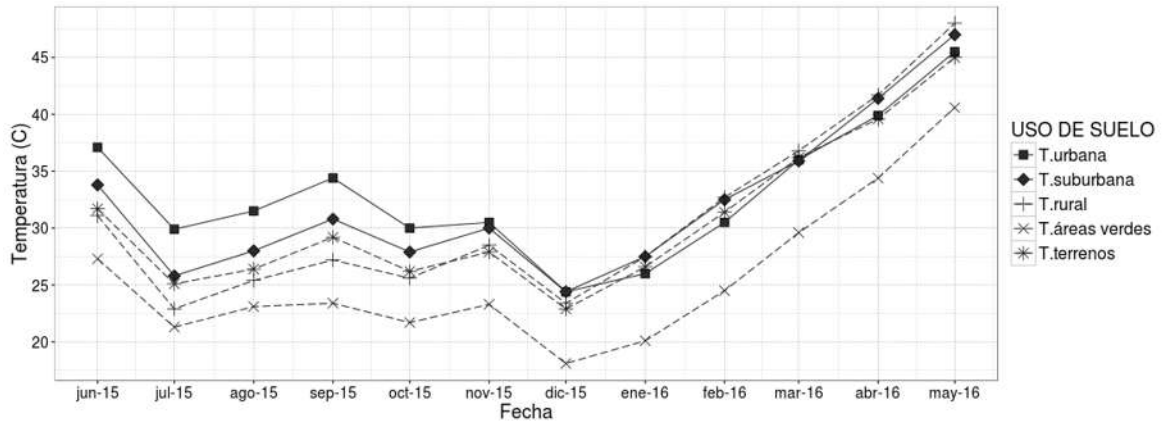


Figura 4. Variación de la temperatura promedio mensual de las diferentes coberturas.

Sin embargo, la dinámica de temperatura superficial cambia a partir del mes de noviembre, en donde la temperatura de las coberturas sigue conservando el mismo patrón (urbano>suburbano>terrenos>rural>áreas verdes) a excepción de las zonas rurales las cuales incrementan su temperatura, superando la temperatura superficial de los terrenos baldíos por 0.6 °C. En el mes de diciembre las temperaturas mas altas las presentaron las zonas urbanizadas (urbano-suburbano) con una temperatura promedio de 24.4 °C, seguido por las zonas rurales, terrenos baldíos y áreas verdes. En el mes enero el uso de suelo con mayor temperatura superficial fue el uso de suelo rural y el suburbano con una temperatura promedio de 27.5 °C en ambos casos, seguido por los terrenos baldíos, el uso de suelo urbano y áreas verdes.

A partir de los meses de febrero a mayo el uso de suelo con mayor temperatura fue el rural, seguido por el uso de suelo suburbano, con excepción del mes de marzo donde los terrenos baldíos y el uso de suelo urbano tuvieron temperaturas mas altas que el uso de suelo suburbano.

Intensidad de isla de calor e isla fría superficial

El análisis de los datos de temperatura superficial, muestra la ocurrencia tanto de una isla de calor urbana, como una isla fría para la ciudad de Morelia. La isla de calor urbana se presenta en los meses de junio a diciembre del 2015 con una intensidad promedio de hasta 7.2 °C en septiembre, sin embargo durante los meses mas secos* (enero – mayo del 2016) se presenta el fenómeno contrario conocido como isla fría en donde las zonas urbanas presentaron una temperatura inferior a los alrededores rurales de hasta 2.3 °C en promedio en el mes de febrero (Tabla 2, figura 5).

Tabla 2. Estadística descriptiva e intensidad de isla de calor (Entre paréntesis se presenta la desviación estándar).

Fecha	Tmin	Tmax	Tmed	IICU
9-jun-15	20.9	47	33.4 (4.2)	6
27-jul-15	7.9	37.5	25.7 (4.3)	7
05-ags-15	13.4	39.8	27.8 (3.9)	6.2
22-sep-15	15.3	42.8	30.1 (4.5)	7.2
15-oct-15	14.2	38.9	27.1 (4.2)	4.4
16-nov-15	15.6	39.9	29.3 (3.4)	1.9
11-dic-15	9.4	33.4	23.7 (3.2)	1
19-ene-16	12.8	39.5	26.8 (3.8)	-1.4
4-feb-16	15.8	45.2	31.7 (4.3)	-2.3
16-mar-16	13.2	49.2	36.1 (4.3)	-0.7
8-abr-16	26.2	53.6	40.8 (4.1)	-1.8
3-may-16	29.6	58	46.7 (4.3)	-2.5

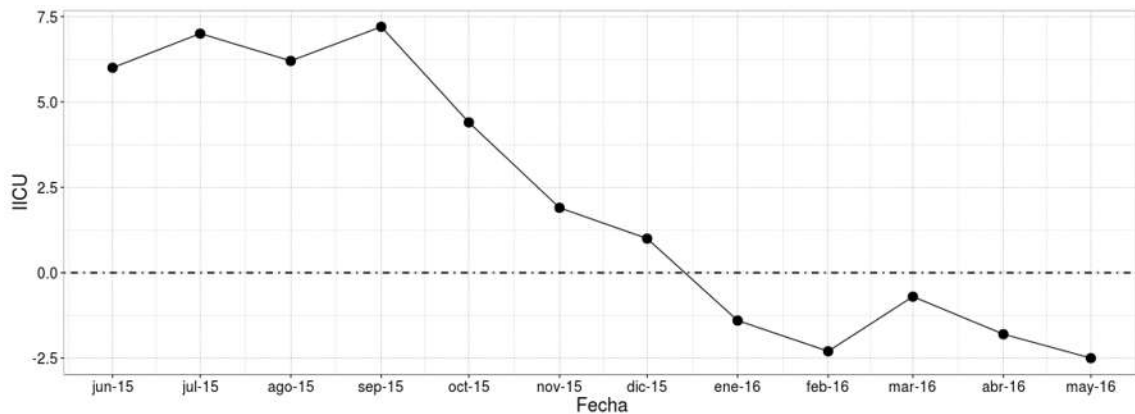


Figura 5. intensidad de isla de calor

Relación entre la temperatura superficial, el ndvi y el uso de suelo

Se realizó el análisis de regresión entre promedio de la temperatura superficial y el promedio del NDVI para todas las coberturas y usos del terreno en el área de estudio. Los resultados del análisis de regresión se presentan en la Figura 6 donde cada punto representa la temperatura superficial promedio y el valor promedio NDVI asociado a cada cobertura del terreno y la desviación estándar tanto para la temperatura superficial como para el NDVI. Los resultados indican una correlación inversa significativa ($\alpha \leq 0.05$) entre la temperatura superficial y el NDVI para el área de estudio, durante los meses de junio a octubre, en donde generalmente los usos de suelo con un NDVI mayor, mostraron la menor temperatura, como en el caso de las áreas verdes las cuales mostraron la menor temperatura a lo largo del año. Sin embargo, a partir del mes de noviembre la significancia de la correlación se pierde.

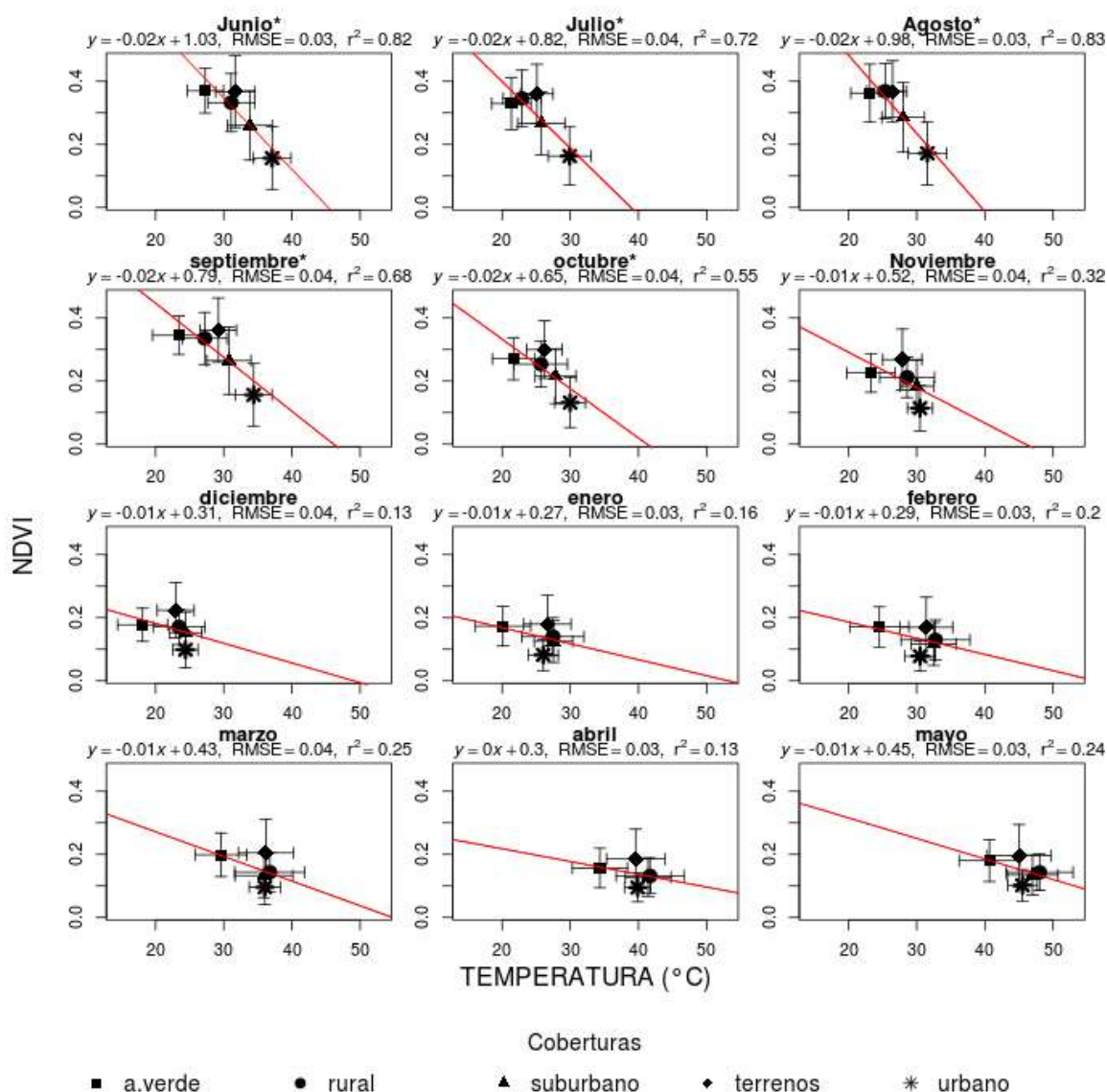


Figura 5. Regresiones lineales entre la temperatura superficial y el NDVI para cada uno de los meses del año. Los meses con asteriscos mostraron correlaciones significativas ($p < 0.05$).

DISCUSIÓN

Las imágenes térmicas mostraron un patrón de menor temperatura en la periferia de la zona de estudio respecto de la zona céntrica en los meses de junio a octubre. Sin embargo en los meses de noviembre y diciembre este patrón cambia y se observa como las zonas de la periferia ubicadas al norte alcanzan temperaturas similares a las del centro de la zona de estudio. Por otro lado al observar las imágenes térmicas durante los meses de invierno y primavera, la temperatura superficial al interior de la ciudad baja respecto a la de la periferia. Las zonas rurales que aumentaron mas su temperatura superficial se localizan al noreste y noroeste de la zona de estudio las cuales se caracterizan por ser zonas de matorral al noroeste y zonas de cultivo y matorrales al noreste (López et al., 2001). Sin embargo las zonas que corresponden a las áreas verdes, como las ubicadas al sur de la zona de estudio, se mantuvieron con una menor temperatura respecto a los otros usos de suelo.

Como se mencionó anteriormente los análisis de varianza y pruebas de Tukey mostraron que la temperatura promedio de las diferentes coberturas fueron diferentes entre sí durante casi todo el año, con excepción de los meses de diciembre y marzo donde las zonas suburbanas y los terrenos baldíos no mostraron diferencias significativas, respecto a las zonas urbanas, debido a que cada una de las coberturas tiene características térmicas particulares (Effat and Hassan, 2014), como en el caso de las zonas urbanas en las cuales los principales materiales utilizados son el concreto y asfalto, los cuales tienen baja reflectancia y una alta absorbancia (Gartland, 2008) e inercia térmica (Chen et al., 2008). Estos materiales contrastan con aquellos presentes en las áreas rurales donde los principales materiales que se encuentran sobre el terreno son el suelo y la vegetación.

En cuanto a la variación temporal de la temperatura superficial, los usos de suelo de la zona de estudio presentan un patrón similar durante los meses de junio octubre, en donde los usos de suelo urbano muestran la mayor temperatura, seguido por el suburbano, los terrenos, las áreas rurales y áreas verdes. Estos cambios están determinados por los cambios en las condiciones climáticas a lo largo del año, ya que investigaciones llevadas a cabo en las dos últimas décadas han demostrado que la temperatura superficial está determinada en respuesta del contenido de humedad del suelo, así como por la cobertura vegetal (Yuan and Bauer, 2007), el flujo de calor latente (Frey et al., 2006a) y la evapotranspiración de las plantas (Ballinas and Barradas, 2016).

En la zona de estudio la temporada de lluvias se sitúa en los meses de mayo a octubre (Cui and de Foy, 2012b), la cual coincide con los meses de mayor intensidad de isla de calor superficial, por otro lado la mayor intensidad de isla fría superficial ocurrió a principios del mes de mayo, justo al final de la época seca, donde había poca cobertura vegetal debido a la poca disponibilidad de agua en el suelo, la cual influye tanto en la fenología natural de las plantas, así como los cambios de cobertura en la zonas agrícolas de la periferia de la ciudad relacionado con los ciclos de cultivo en los terrenos de riego y temporal.

Los resultados de las regresiones entre el NDVI y la temperatura superficial, arrojaron que existe una relación entre la temperatura superficial y el NDVI durante los meses de mayor precipitación, a excepción del mes de mayo, ya que la toma de la imagen analizada ocurrió durante los primeros días del mes (3 de mayo del 2015), justo al final de la temporada de seca. Tanto las mediciones de NDVI y de temperatura superficial mostraron patrones relacionados con las variaciones estacionales de precipitación.

La máxima intensidad de isla de calor fue de 7.2 °C y se alcanzó en el mes de septiembre, en otros estudios en los que se han utilizado imágenes Landsat, se han reportado intensidades que van desde los 10°C (Córdova, 2010) hasta los 2.14 °C (Feng et al., 2014). En cuanto a la intensidad de isla fría superficial, el fenómeno ha sido reportado en ciudades ubicadas en climas secos durante el día (Frey et al., 2006b; Rasul et al., 2015) con intensidades que van desde los 2°C (Agglomeration and Planning, 2011) a los 4.6°C (Rasul et al., 2015).

CONCLUSIONES

Mediante el presente estudio fue posible detectar los cambios en la intensidad de isla de calor e isla fría superficial, utilizando imágenes multitemporales Landsat 8 en un periodo de un año en una ciudad de latitud media ubicada en una región subtropical. El fenómeno de ICS se presentó en los meses de mayor precipitación (junio a diciembre) con una intensidad máxima de 7.2°C en el mes de septiembre, mientras que el IFS en los meses mas secos (enero a mayo) con una mayor intensidad máxima de 2.5°C en el mes de mayo. Los análisis de varianza y pruebas de Tukey realizadas en todas las fechas, mostraron que existen diferencias significativas entre la temperatura superficial entre los usos de suelo, a excepción del mes de diciembre donde los usos de suelo urbano y suburbano no mostraron diferencias y marzo donde el uso de suelo urbano y terrenos baldíos no mostraron diferencias.

La cobertura del terreno con la menor temperatura a lo largo del año fueron las áreas verdes. Estas diferencias en la temperatura superficial entre los usos de suelo se deben a las características térmicas particulares de los materiales de la superficie de la zona de estudio. Por otro lado, la variabilidad de temperatura superficial a través del tiempo se debe a cambios en las condiciones climáticas a lo largo del año, las cuales modifican el contenido de humedad en el suelo y la cobertura vegetal. El análisis de regresión lineal indica una correlación inversa significativa, entre la temperatura superficial promedio y el NDVI promedio para el área de estudio, en las imágenes tomadas dentro de la temporada de lluvias (junio a octubre), en donde los usos de suelo con un NDVI mayor, mostraron la menor temperatura, lo cual se explica por el proceso de disminución de temperatura asociado la transpiración de la vegetación.

REFERENCIAS

- Agglomeration, C.U. and Planning, U. (2011), “Spatio-temporal Pattern of Urban Cool Island Intensity and Its Eco-environmental Response in”, Vol. 1 No. 9, pp. 1–6.
- Artis, D.A. and Carnahan, W.H. (1982), “Survey of emissivity variability in thermography of urban areas”, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 12 No. 4, pp. 313–329.
- Ballinas, M. and Barradas, V.L. (2016), “The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model”, *Journal of Environment Quality*, Vol. 45 No. 1, p. 157.
- Breiman, L. (2001), “Random forests”, *Machine Learning*, Vol. 45 No. 1, pp. 5–32.
- Chen, Y., Du, M. and Dong, R. (2008), “Correlation Between Urban Heat Island Effect and the Thermal Inertia Using Aster Data in Beijing , China”, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 37, pp. 1723–1728.
- CONAPO. (2016), “Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010”, *Consejo Nacional de Población, México*, available at: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Zonas_metropolitanas_2010 (accessed 20 December 2015).
- Córdova, K. (2010), “Impactos De Las Islas Térmicas O Islas De Calor Urbano , En El Ambiente Y La Salud Humana. ANÁLISIS ESTACIONAL COMPARATIVO:

- CARACAS, OCTUBRE- 2009, MARZO- 2010”, pp. 95–122.
- Cui, Y.Y. and de Foy, B. (2012a), “Seasonal Variations of the Urban Heat Island at the Surface and the Near-Surface and Reductions due to Urban Vegetation in Mexico City”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 51 No. 5, pp. 855–868.
- Cui, Y.Y. and de Foy, B. (2012b), “Seasonal Variations of the Urban Heat Island at the Surface and the Near-Surface and Reductions due to Urban Vegetation in Mexico City”, pp. 855–868.
- Effat, H.A. and Hassan, O.A.K. (2014), “Change detection of urban heat islands and some related parameters using multi-temporal Landsat images; a case study for Cairo city, Egypt”, *Urban Climate*, Elsevier B.V., Vol. 10 No. P1, pp. 171–188.
- EPA. (2016), “Heat Island Impacts”, available at: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-impacts#health> (accessed 3 January 2017).
- Fabrizi, R., Bonafoni, S. and Biondi, R. (2010), “Satellite and ground-based sensors for the Urban Heat Island analysis in the city of Madrid”, *Remote Sensing*, Vol. 2, pp. 1400–1415.
- Farina, A. (2012), “Exploring the relationship between land surface temperature and vegetation abundance for urban heat island mitigation in Seville, Spain”, *LUMA-GIS Thesis Nr, No. 15*, available at: <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOid=3460284&fileOid=3460402>.
- Feng, H., Zhao, X., Chen, F. and Wu, L. (2014), “Using land use change trajectories to quantify the effects of urbanization on urban heat island”, *Advances in Space Research*, COSPAR, Vol. 53 No. 3, pp. 463–473.
- Frey, C.M., Rigo, G. and Parlow, E. (2006a), “The cooling effect of cities in a hot and dry environment”, *Global Developments in Environmental Earth Observation from Space*, pp. 0–169.
- Frey, C.M., Rigo, G. and Parlow, E. (2006b), “Investigation of the daily Urban Cooling Island (UCI) in two coastal cities in an arid environment: Dubai and Abu Dhabi (UAE).”, pp. 169–174.
- García, E. (1987), *Modificaciones Al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Gartland, L. (2008), *Heat Islands : Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas*, Earthscan.
- IMDUM. (2012), “Adecuaciones al Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Morelia 2010”, Instituto Municipal de Desarrollo Urbano de Morelia, México.
- INEGI. (2014), “Carta topográfica Morelia”, *Instituto Nacional de Estadística Geografía E Informática, México*, available at: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825206215> (accessed 15 February 2015).
- Krüger, E., Drach, P., Emmanuel, R. and Corbella, O. (2013), “Urban heat island and differences in outdoor comfort levels in Glasgow, UK”, *Theoretical and Applied*

Climatology, Vol. 112, pp. 127–141.

- Li, Y.Y., Zhang, H. and Kainz, W. (2012), “Monitoring patterns of urban heat islands of the fast-growing Shanghai metropolis, China: Using time-series of Landsat TM/ETM+ data”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Elsevier B.V., Vol. 19, pp. 127–138.
- Liaw, A. and Wiener, M. (2015), “Package ‘randomForest’”, available at: <https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/>.
- López, E., Bocco, G. and Mendoza, M. (2001), “Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo . El caso de la ciudad de Morelia Prediction about changes in land-use . The case of Morelia”, *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM*, Vol. 45, pp. 56–76.
- Mallick, J., Singh, C.K., Shashtri, S., Rahman, A. and Mukherjee, S. (2012), “Land surface emissivity retrieval based on moisture index from LANDSAT TM satellite data over heterogeneous surfaces of Delhi city”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Elsevier B.V., Vol. 19 No. 1, pp. 348–358.
- Miller, R.G. (1981), *Simultaneous Statistical Inference*, Springer.
- Mills, G. (2004), “The Urban Canopy Layer Heat Island IAUC Teaching Resources”, *International Association for Urban Climate*, pp. 1–5.
- Mohamed, A.A., Odindi, J. and Mutanga, O. (2016), “Land Surface Temperature and Emissivity Estimation for Urban Heat Island assessment using medium and low resolution space-borne sensors : A review”, Vol. 6049 No. February, available at: <http://doi.org/10.1080/10106049.2016.1155657>.
- Moreno, M. del C. (1999), *Climatología Urbana*, Edicions Universitat de Barcelona.
- Oke, T.R. (1982), “The energetic basis of the urban heat island”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 108, pp. 1–24.
- Oke, T.R. (1995), “The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects”, *Wind Climate in Cities*, pp. 81–107.
- Oke, T.R. (2006), “Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites”, *World Meteorological Organization*, available at: <http://doi.org/Reporte>.
- Rasul, A., Balzter, H. and Smith, C. (2015), “Spatial variation of the daytime Surface Urban Cool Island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8”, *Urban Climate*, Elsevier B.V., Vol. 14, pp. 176–186.
- Roth, M. (2007), “Review of urban climate research in (sub)tropical regions”, Vol. 1873 No. August, pp. 1859–1873.
- Santamouris, M. (2014), “On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings”, *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., Vol. 82, pp. 100–113.
- SMN. (2016), “Normales Climatológicas: Estación 16080 Morelia”, *Servicio Meteorológico Nacional, México*, available at: <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Normales5110/NORMAL16080.TXT>.

- Srinivasan, S. (2013), “Using data from the Landsat 8 TIRS instrument to estimate surface* temperature”, available at: <http://geohackers.in/2013/08/using-data-from-the-landsat-8-tirs-instrument-to-estimate-surface-temperature/> (accessed 24 May 2015).
- Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., Zhen, X., et al. (2010), “The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai”, *International Journal of Biometeorology*, Vol. 54, pp. 75–84.
- UNFPA. (2007), “Estado de la población mundial 2007”, *Fondo de Población de Las Naciones Unidas*.
- USGS. (2015a), “Using the USGS Landsat 8 Product”, available at: https://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php (accessed 24 May 2015).
- USGS. (2015b), “Landsat 8 (L8) Data Users Handbook”, *Earth Resources Observation and Science (EROS) Center*, Vol. 8 No. June, p. 97.
- USGS. (2016), “Frequently Asked Questions about the Landsat Missions”, available at: http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php (accessed 21 July 2016).
- Voogt, J.A. (2004), “Urban Heat Islands: Hotter Cities”, *Action Bioscience*, available at: <http://www.actionbioscience.org/environment/voogt.html>.
- Voogt, J. a. and Oke, T.R. (2003), “Thermal remote sensing of urban climates”, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 86, pp. 370–384.
- Weng, Q. (2009), “Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Elsevier B.V., Vol. 64 No. 4, pp. 335–344.
- Weng, Q., Lu, D. and Schubring, J. (2004), “Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies”, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 89 No. 4, pp. 467–483.
- Yandell, B.S. (1997), *Practical Data Analysis for Designed Experiments*, Chapman & Hall.
- Yow, D.M. (2007), “Urban Heat Islands : Observations , Impacts , and Adaptation”, *Geography Compass*, Vol. 6, pp. 1227–1251.
- Yuan, F. and 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*, Vol. 106 No. 3, pp. 375–386.

10.2 ANÁLISIS ESTACIONAL DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL Y SU RELACIÓN CON LA ISLA DE CALOR E ISLA FRÍA URBANA SUPERFICIAL EN MORELIA MICHOACÁN

INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios, las ciudades fueron la fuente de los mayores desafíos que el planeta ha enfrentado. A pesar de que han demostrado ser los motores de la creatividad humana, la creación de riqueza y el crecimiento económico, las ciudades también han sido la fuente de muchos de los problemas globales como el cambio climático, la contaminación, la delincuencia, la enfermedades y la pobreza (Bettencourt y West, 2010). El proceso de urbanización a escala global aumentó a partir de la segunda mitad del siglo XX. Durante la década de los años 50s el 30% de la población mundial vivía en zonas urbanas, sin embargo, hoy en día, más de la mitad viven en los centros urbanos (UNFPA, 2007). Actualmente alrededor del 80% de la población en países desarrollados vive en ambientes urbanizados y se espera que esto sea cierto para todo el planeta en torno al año 2050, con cerca de 2 mil millones de personas migrando a las ciudades, especialmente en China, India, el sudeste de Asia y África (Habitat, 2012).

Muchas áreas urbanas y suburbanas experimentan temperaturas elevadas en comparación con sus entornos rurales; esta diferencia de temperatura constituye una isla de calor urbana (ICU).

La teledetección mediante sensores montados en satélites, se ha utilizado para analizar la relación espacial entre la temperatura del aire y la temperatura térmicas superficiales, en relación con las islas de calor (Schwarz, Schlink, Franck, y Grobmann, 2012). Tanto el uso de estaciones climáticas como el uso de teledetección térmica infrarroja son métodos ampliamente utilizados para el estudio de las ICUs (Rizwan, Dennis, y Liu, 2008).

En este texto se emplean dos fuentes de información complementarias en el análisis espacio-temporal de la temperatura de superficie de la ciudad de Morelia, Michoacán. La primera son series de tiempo de alta resolución temporal (60 minutos) de estaciones termométricas distribuidas en distintos usos del suelo. La segunda corresponde a una serie de mapas mensuales de temperatura de superficie diurna generados a partir del análisis de imágenes de satélite (LANDSAT 8) para la zona urbana de la ciudad y su área aledaña.

Los objetivos de esta parte del trabajo son primero; comparar entre la temperatura superficial diurna calculada empleando la información satelital y la temperatura ambiente registrada por las estaciones termométricas, y segundo realizar un análisis temporal de la temperatura ambiente a partir de la información de las estaciones termométricas.

ÁREA DE ESTUDIO

La localidad de Morelia es la ciudad mas grande y capital del estado de Michoacán, con una población de 829,625 (CONAPO, 2016). Se encuentra ubicada entre los paralelos 19.62° y 19.79° de latitud norte y los meridianos -101.33° y 101.07° longitud oeste, con una altitud promedio de 1,940 msnm. Tiene un clima de tipo Cb(w1)(w)(i')g; templado con lluvias en verano, con una temperatura promedio anual de 18.9 °C. La precipitación promedio anual es de 794.4 mm (SMN, 2016). El área metropolitana con una extensión de 111.4 km² (INEGI, 2014) de los cuales un % corresponde a coberturas urbanas , un % a zonas suburbanas y un % de áreas verdes.

Las zonas rurales inmediatas a la ciudad se componen de campos de cultivos al norte y al sur, pastizales y matorrales noroeste; al este matorrales y pastizales; y al sureste por zonas con relictos de bosque (López et. al., 2001) sin embargo para efectos comparativos las zonas rurales para el presente estudio se tomaron a partir de la generación de un buffer de 500 m a partir de los límites de la ciudad (Figura 1).

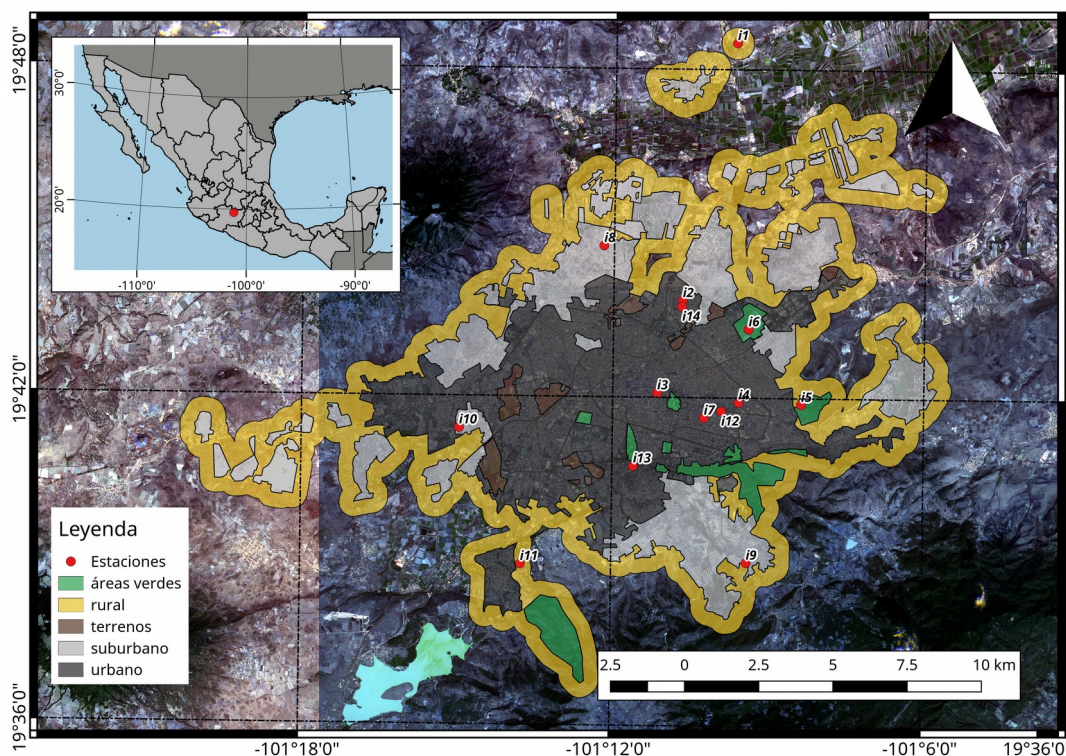


Figura 1. Área de estudio y ubicación de las estaciones termométricas.

METODOLOGÍA

Obtención de datos de temperatura ambiental.

Para la toma de datos de temperatura ambiente se emplearon 10 estaciones termométricas automáticas digitales, construidas a partir de un sensor termométrico digital automático iButton® ThermoChron modelo DS1921G (Maximintegrated, 2015) colocado dentro de un escudo solar de policarbonato recubierto con cinta metálica reflejante basado en el diseño

de (Holden et. al., 2013). Cada una de las estaciones se programó para tomar datos de temperatura ambiente cada hora, durante un periodo de un año (del 3 de junio del 2015 al 3 de junio del 2016). Las estaciones se colocaron a una altura de 1.5 metros sobre el nivel del suelo y en techos de edificaciones de un solo nivel. Las estaciones se distribuyeron en estratégicamente en diferentes usos de suelo (Cuadro 1), con el objetivo de tener al menos 2 repeticiones por cada uso de suelo.

Cuadro 1. Ubicación y uso del suelo para las diferentes estaciones empleadas en este estudio. ET: estación termométrica, EM: estación meteorológica.

Clave de estación	Ubicación (coordenadas, longitud oeste / latitud norte)	Altitud (m.s.n.m.)	Uso del suelo	Observaciones
ET 1 (Mesón nuevo)	101° 9' 40.0"/19° 48' 28.8"	1900	Rural	Edificación aislada adyacente a campos de cultivo y matorral
ET 2 (C. Puerto)	101° 10' 40.2"/19° 43' 46.3"	1907	Urbano	Alta densidad
ET 3 (Centro)	101° 11' 8.6"/19° 42' 4.8"	1912	Urbano	Centro histórico de la ciudad, edificaciones de cantera e intensa actividad comercial
ET 4 (Fovisste A.)	101° 9' 34.2"/19° 41' 54.9"	1942	Urbano	Casas de interés social
ET 5 (Punhuato)	101° 8' 21.9"/19° 41' 53.1"	2107	Área verde	Área natural protegida "Cerro de Punhuato" adyacente a área urbana.
ET 6 (C. Industrial)	101° 9' 23.7"/19° 43' 15.3"	1948	Área verde	Parque ecológico Cd. Industrial, rodeado de uso urbano y suburbano.
ET 7 (Chapultepec)	101° 10' 14.2"/19° 41' 37.8"	1914	Urbano	Zona residencial cercana al centro de la ciudad
ET 8 (Torreón)	101° 12' 11.9"/19° 44' 45.6"	1902	Suburbano	Densidad habitacional moderada, terrenos baldíos y casas en construcción
ET 9 (J. del Monte)	101° 9' 23.7"/19° 38' 59.4"	2111	Rural	Adyacente a campos de cultivo y zonas forestales
ET 10 (INIRENA)	101° 14' 57.4"/19° 41' 24.7"	1895	Suburbano	Adyacente zona con densidad media, dentro de un centro de investigación con baja densidad de construcción.
EM 11 (UNAM)	101° 13' 38.2"/19° 38' 49.5"	1964	Rural	Edificaciones aisladas con vegetación arbórea (eucaliptos) adyacente.
EM 12 (Acueducto)	101° 09' 55.8"/19° 41' 45.1"	1932	Urbano	Alta densidad de edificaciones, adyacente a dos avenidas principales
EM 13 (Sta. Maria)	101° 11' 33.6"/19° 40' 46.6"	1970	Suburbano	Oficinas gubernamentales rodeadas de arbolado
EM 14 (C. Puerto)	101° 10' 40.5"/19° 43' 39.7"	1920	Urbano	Alta densidad de edificaciones

Se recolectaron datos meteorológicos en tiempo real de la red meteorológica del organismo operador de agua potable municipal (OOAPAS) y una estación meteorológica perteneciente a la Universidad Autónoma de México, empleando el manejador de procesos automatizados *crontab* para Linux (Debian/Ubuntu) y un programa para la descarga y lectura de los archivos dentro del ambiente de programación estadística R v 3.1.1 invocado para correr de forma automática como *background* ó *daemon* de Linux empleando un script Linux-Shell dentro de una computadora con sistema operativo Linux Ubuntu 11.04

Teledetección térmica infrarroja.

La temperatura superficial se derivó a partir de la banda 10 tomada por el sensor térmico infrarrojo del satélite Landsat 8. El satélite pasa aproximadamente a las 11:11 am (hora local). Se seleccionó una imagen por mes durante un periodo de un año. A las imágenes seleccionadas, se les eliminaron las zonas con nubosidad utilizando como capa de filtrado la imagen georreferenciada de calidad LandsatLook de 8 bits "QB. Png". La cual proporciona una imagen raster con la calidad de los píxeles para tener una vista rápida de la calidad de las escenas (USGS, 2015a).

Los datos de temperatura de brillo de satélite se derivaron a partir de la información proporcionada por la banda térmica infrarroja 10 de la misión Landsat 8 (USGS, 2015b). Esta información se corrigió a partir de los valores de emisividad de distintos materiales, propuesto por (Mallick, et.al., 2012), mediante la ecuación 1:

$$T_s = \frac{T_B}{1 + (\lambda T_B / \rho) \ln \epsilon} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde: T_s = Temperatura superficial en grados kelvin (K), T_B = Temperatura de brillo de satélite, λ = longitud de onda de radiancia emitida (11.5 μm), ϵ = emisividad y $\rho = h * c / s$ ($1.438 * 10^{-2}$ m K), h = constante de planck (Js), c = velocidad de la luz ($2.998 * 10^8$ m/s), s = Constante de Boltzmann ($1.38 * 10^{-23}$ J/K).

Relación entre temperatura ambiente y temperatura superficial

Se realizaron regresiones lineales y análisis de correlación entre la temperatura ambiente tomada por las 14 estaciones, a la hora más próxima de paso de los satélites sobre la zona de estudio (11:00 am hora local) y la temperatura superficial calculada a partir de los números digitales proporcionados por el sensor TIRS (Thermal Infrared Sensor) a bordo del satélite Landsat 8.

Variación estacional de la intensidad de isla de calor superficial (ICU) e isla de calor atmosférica (ICU).

La intensidad de isla de calor se calculó mediante la diferencia de temperatura de las zonas urbanas y rurales según la ecuación 2:

$$IICU = T_{prom_U} - T_{prom_R} \quad \text{Ec. 2}$$

En donde:

T_{prom_U} = a la temperatura urbana promedio, T_{prom_R} = a la temperatura rural promedio.

En el presente trabajo la IICU se calculó mediante la diferencia de temperaturas promedio horarias de las estaciones ubicadas en los usos de suelo urbano y rural.

Se analizaron los cambios en las intensidades horarias de la ICU definiendo tres épocas, conforme a lo propuesto por (Cui & de Foy, 2012) época fría-seca (Noviembre-Febrero),

cálida-seca(Marzo-Mayo) y la temporada lluviosa (junio-octubre) mediante análisis de varianza ANOVA y pruebas de tukey.

RESULTADOS

El comportamiento de la temperatura ambiental presenta un patrón de variación en paralelo para las temperaturas de las estaciones termométricas, presentando similitudes en las oscilaciones térmicas, siendo visualmente mas obvias, cuando se presentan eventos climáticos atípicos como el señalado entre líneas punteadas en la figura 2, en donde ocurrió una tormenta invernal con caída de nieve en zonas aledañas con altitudes superiores a los 2400 msnm y velocidades del viento elevadas, en el mes de marzo. Se obtuvieron un total de 86272 datos lo cual representa el 98.2% del total de los datos que se pudieron haber obtenido.

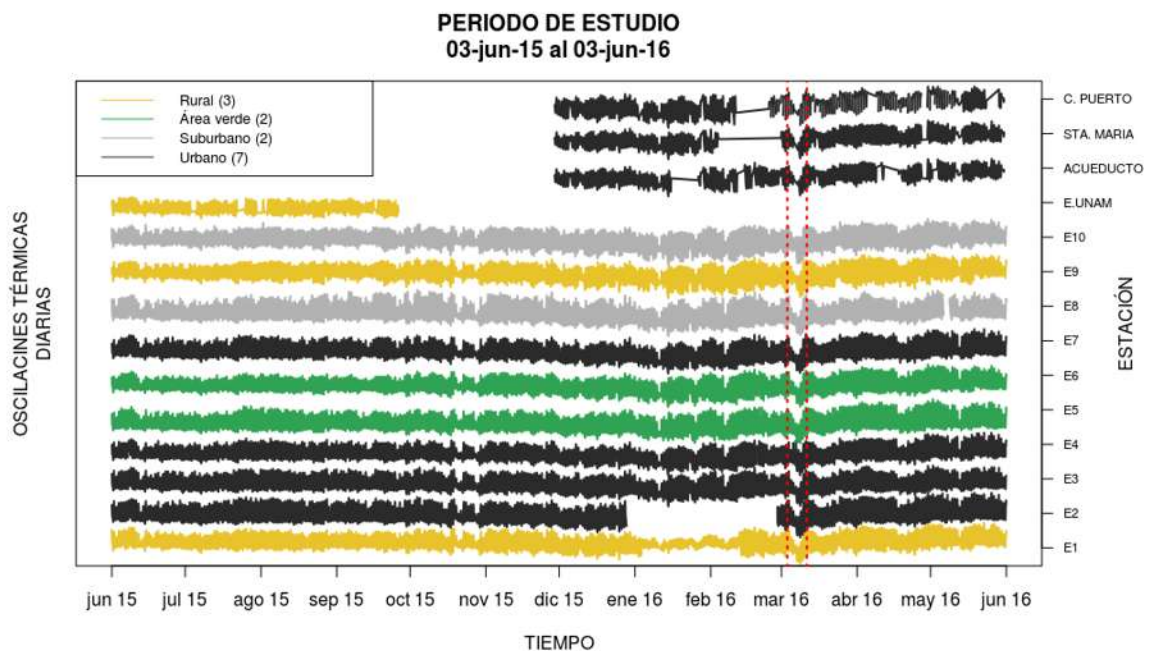


Figura 2. Marchas térmicas anuales de las estaciones termométricas. Durante el periodo de tiempo entre las líneas punteadas se presentó una tormenta invernal atípica del 8 al 13 marzo del 2015.

Análisis anual y estacional

El análisis anual de varianza ($F=616.3$, $gl=3$, $p<0.001$) y la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) de los datos de temperatura ambiente por uso de suelo, mostraron que no existen diferencias significativas entre la temperatura de los usos de suelo rural y las áreas verdes, sin embargo estas si difieren de sus contraparte urbanizadas las cuales a su vez difieren entre si. Los usos de suelo urbano ($19.6\text{ }^{\circ}\text{C}$) y suburbano ($19.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) mostraron las mayores temperaturas promedio durante todo el año respecto de las zonas rurales y áreas verdes las cuales tuvieron una temperatura promedio anual de $17.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 3).

De la misma manera el análisis estacional de temperatura ambiente mostró que existen diferencias significativas ($F=4741$, $gl=2$, $p<0.001$) entre las tres estaciones características de la zona de estudio, presentándose la temperatura promedio horaria mas alta ($20.9\text{ }^{\circ}\text{C}$) en

la época cálida-seca, seguida de la temporada de lluvias con una temperatura de 19.5 °C. La temperatura promedio horaria mas baja se presento en la época fría-seca (16.5 °C) (Figura 3).

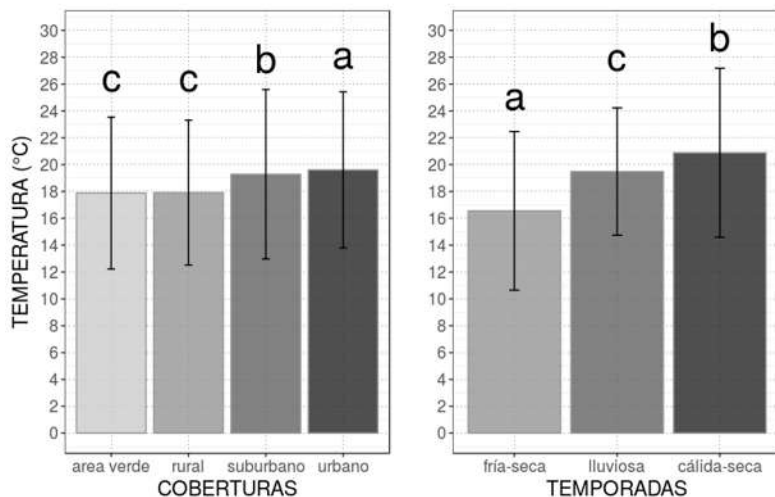


Figura 3. Promedio anual de la temperatura ambiental en los diferentes usos de suelo y por temporadas. Se muestra la desviación estándar y las diferencias entre los grupos mediante letras ($\alpha \leq 0.05$).

La temperatura promedio del aire de los diferentes usos varió durante las tres épocas del año. En la época fría-seca se encontraron diferencias significativas entre la temperatura ambiental de los usos de suelo urbanizados y los no urbanizados ($F=88.54$, $gl=3$, $p<0.001$). En la época de lluvias no se encontraron diferencias entre la temperatura ambiente del uso de suelo rural y las áreas verdes, pero si entre los usos de suelo urbano y suburbano ($\alpha \leq 0.05$). Durante la época cálida-seca la prueba de Tukey mostró que todas las coberturas presentan diferencias significativas (Figura 4).

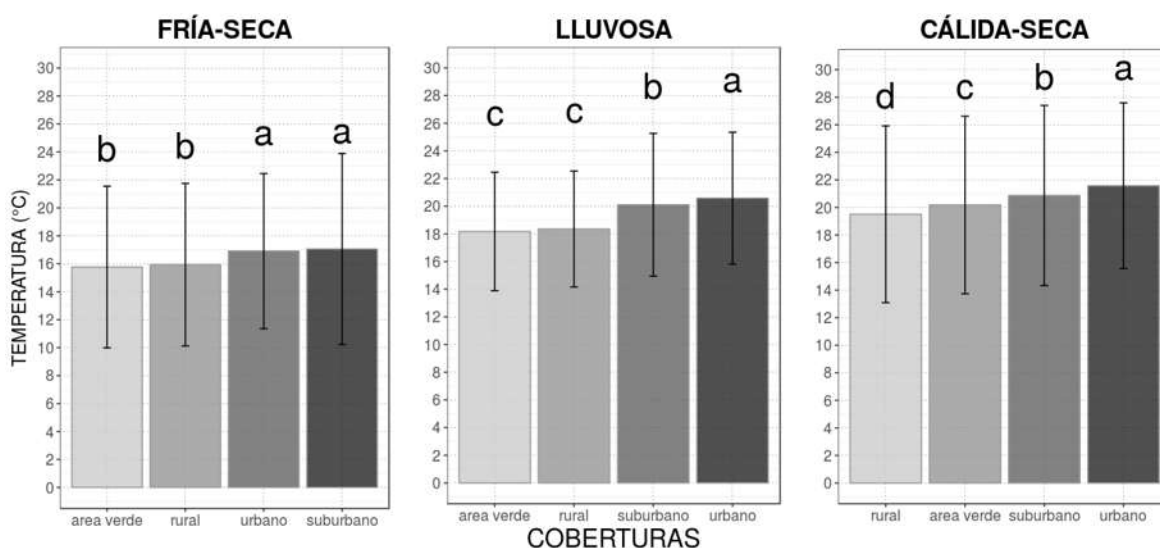


Figura 4. Comparativa de la temperatura promedio del aire de los diferentes usos de suelo, durante tres épocas del año. Letras diferentes muestran que existen diferencias estadísticas significativas ($\alpha \leq 0.05$). La desviación estándar se muestra sobre cada una de las barras.

Intensidad de isla de calor urbana (IICU)

El fenómeno de isla de calor se presentó durante las 24 horas del día, teniendo una intensidad promedio anual de 1.9 °C. Durante el periodo nocturno (19:00-6:00 hrs) el comportamiento de la IICU se mantuvo estable, manteniendo intensidades de 1.4 y 1.7 °C. En el día la intensidad aumentó casi al doble respecto del periodo nocturno, alcanzando una máxima intensidad promedio (3 °C) a las 13 horas, sin embargo la intensidad mínima se registró también durante el día unas horas después del amanecer a las 9 horas con una intensidad de 1.1°C (Figura 5).

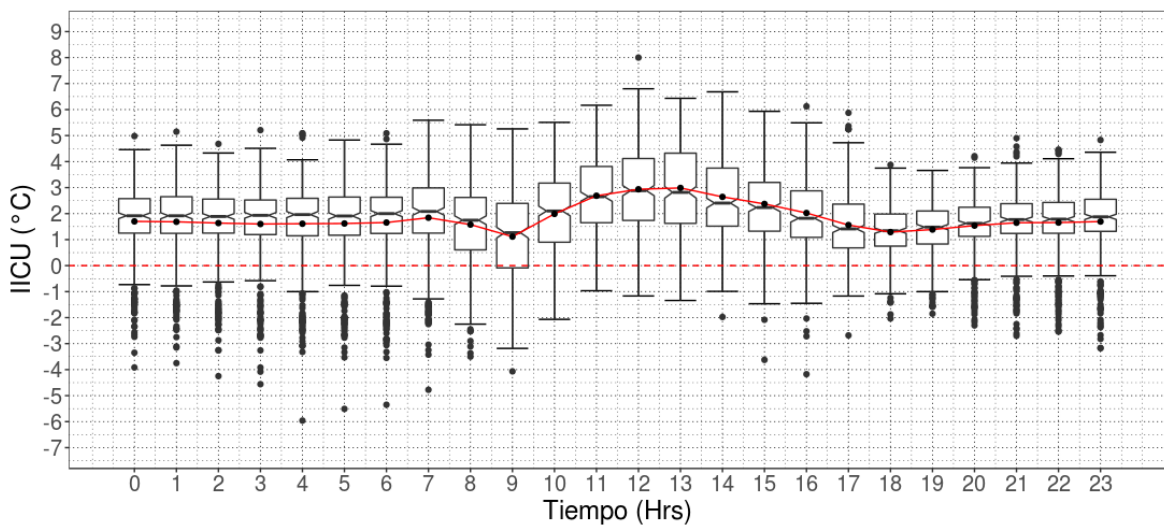


Figura 5. Distribución horaria anual de la ICU. La línea roja continua representa la intensidad promedio horaria.

Las intensidades promedio por época del año fue de 1.3° C para la temporada fría-seca, 1.9 °C para la cálida-seca y de 2.2 °C para la época de lluvias.

El análisis estacional de la IICU mostró que al durante la mayor parte del periodo diurno (8:00-17:00) en la temporada de lluvias, se alcanzan las mayores intensidades siendo el periodo entre las 12:00 y 13:00 horas el periodo con mayor intensidad (3.9°C). La temporada fría-seca sigue un patrón muy parecido al de la época lluviosa, llegando a una máxima intensidad a las 12:00 y 13:00 horas con intensidades de 2.9 y 2.8°C respectivamente. Durante la época cálida-seca las mayores intensidades se presentaron en el periodo nocturno, entre el atardecer y el amanecer (19:00-7:00), manteniéndose una intensidad de entre los 2.5 y los 2.6°C entre las 23:00 y las 6:00 horas, sin embargo a partir de las 7 horas la intensidad comienza a caer abruptamente presentándose el fenómeno de isla fría a las 9:00 en donde la temperatura promedio de las estaciones rurales fue mayor respecto de las estaciones urbanas.

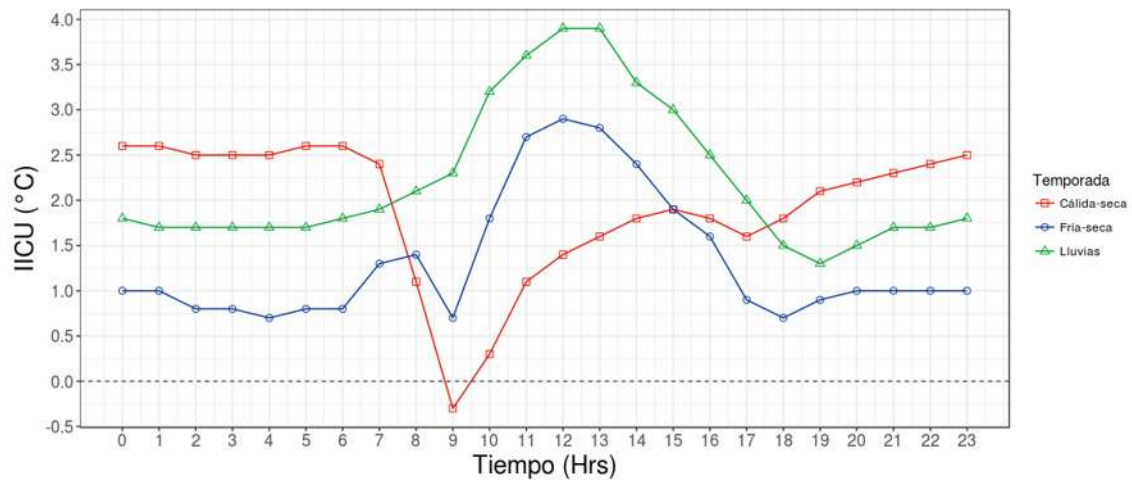


Figura 6. Intensidad promedio horaria por época del año.

Relación entre la temperatura superficial y la temperatura ambiental

Los análisis de correlación entre la temperatura superficial obtenida mediante imágenes de satélite y la temperatura ambiente mostraron que existen correlaciones positivas significativas en los meses de julio a octubre ($\alpha \leq 0.05$) aproximadamente a las 11:00 am (hora local) (Figura 7).

La temperatura superficial máxima alcanzada fue de 49.1 °C se obtuvo en el mes de mayo tomada en el pixel bajo la estación 10 que ubicada en una zona suburbana, la temperatura mínima fue de 17 °C en el área correspondiente a la estación 13 la cual corresponde a una estación suburbana rodeada de árboles. La temperatura ambiental máxima fue de 35 °C fue registrada por la estación urbana 7 en el mes de mayo, la temperatura mínima registrada fue de 14.2 °C por la estación 13 ubicada en una una zona suburbana rodeada de árboles.

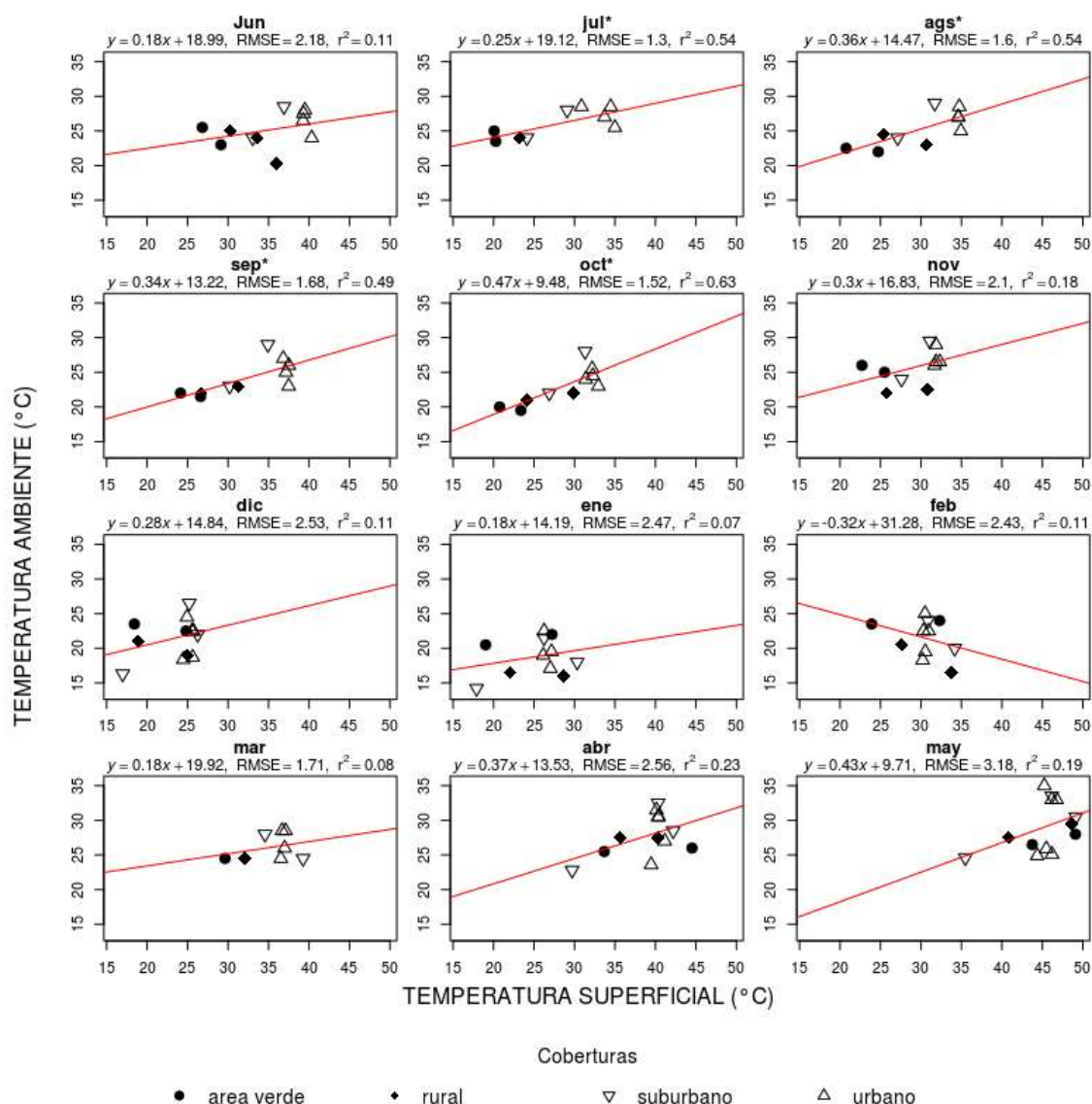


Figura 7. Regresiones lineales entre la temperatura ambiental y la temperatura superficial. Cada Figura dentro de los gráficos representa la temperatura promedio asociada a cada cobertura. Los meses con asteriscos mostraron correlaciones significativas ($p < 0.05$).

En el cuadro 2 se muestran estadística descriptiva e intensidad promedio de isla de calor superficial de cada una de las imágenes, en donde esta se presenta en los meses de junio a diciembre del 2015, sin embargo durante los meses mas secos (enero – mayo del 2016) se presenta el fenómeno contrario conocido como isla fría en donde las zonas urbanas presentaron una temperatura inferior a los alrededores rurales.

Al comparar la ocurrencia del fenómeno de isla de calor urbana superficial con las marchas térmicas de temperatura ambiente promedio por uso de suelo de los días de adquisición de las imágenes satelitales Landsat 8, el fenómeno de isla de calor urbana atmosférica ocurre los mismos días que la isla de calor urbana superficial. Por otro lado el fenómeno de isla fría superficial también coincide con los días donde hay ocurrencia de isla de calor urbana atmosférica, con excepción del mes de marzo en donde se presentó el fenómeno de isla fría superficial con la menor intensidad (Figura 8).

Cuadro 2. Estadística descriptiva e intensidad de isla de calor superficial (IICUs) y atmosférica (IICUa).

Fecha	IICUs	IICUa
9-jun-15	6	3.5
27-jul-15	7	2.3
05-ags-15	6.2	2.7
22-sep-15	7.2	3.8
15-oct-15	4.4	2.6
16-nov-15	1.9	3.8
11-dic-15	1	1.8
19-ene-16	-1.4	-0.2
4-feb-16	-2.3	0.3
16-mar-16	-0.7	2.6
8-abr-16	-1.8	-0.8
3-may-16	-2.5	-2

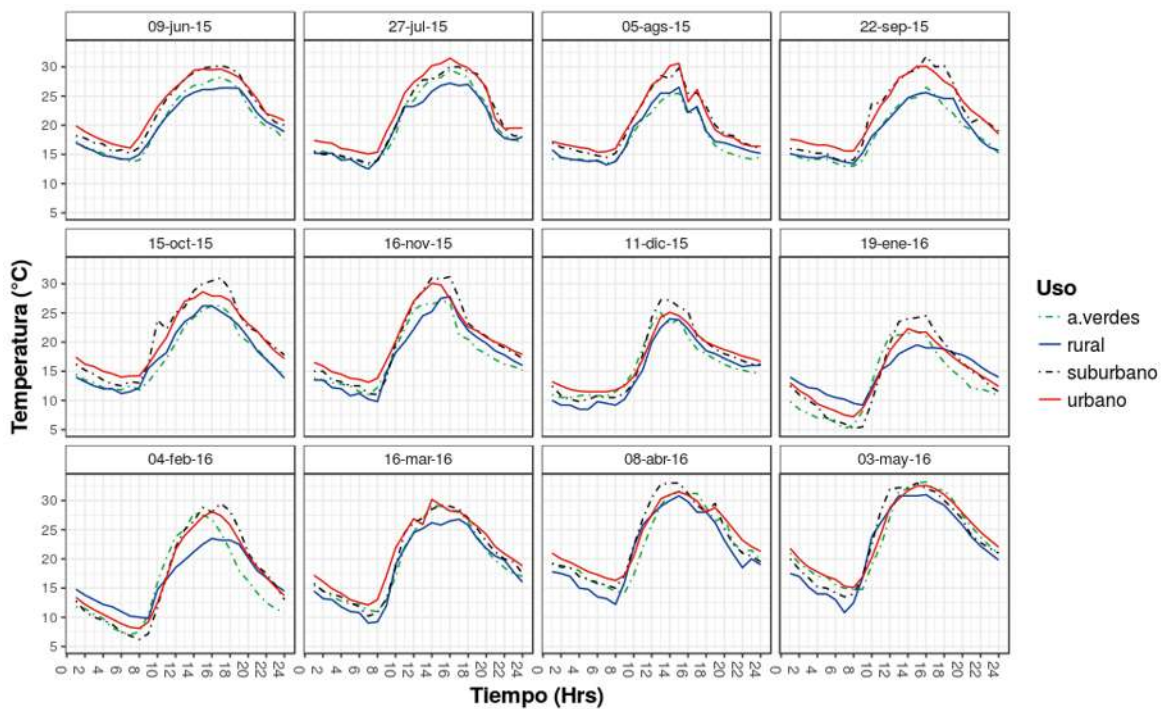


Figura 8. Marchas térmicas del día de adquisición de las imágenes satelitales Landsat 8.

CONCLUSIONES

Las estaciones termométricas cumplieron satisfactoriamente al registrar más del 98% de los datos que se pudieron haber obtenido, el único periodo sin datos correspondió a un periodo de aproximadamente un mes y medio en la estación urbana número 2, debido a que tuvo un error al ser programada. Mediante el uso de imágenes térmicas infrarrojas y estaciones termométricas fue posible detectar y cuantificar la intensidad de isla de calor urbana superficial y del dosel. Las áreas urbanizadas mostraron diferencias de temperatura significativas en respecto de las coberturas rurales y áreas verdes, tanto en la temperatura superficial como en la temperatura ambiente. Los usos de suelo urbanizados mostraron temperaturas más altas respecto de sus contraparte sin urbanización. Los análisis de correlación entre la temperatura superficial y la temperatura ambiente mostraron que existen correlaciones positivas significativas en los meses de julio a octubre (durante la estación lluviosa) a las 11:00 am (hora local). Mediante pruebas estadísticas fue posible demostrar que existen diferencias entre la temperatura del aire de la temporada de seca-cálida y seca-fría, así como la temporada lluviosa. Es análisis anual mostró que existe una intensidad positiva de isla de calor urbana durante todo el día. La intensidad promedio anual fue de 1.9° C, sin embargo el análisis horario permitió conocer la hora y la estación de máxima intensidad, ubicándose este periodo durante temporada de seca-fría entre las 11 y 12 horas.

Con estos datos y con las correlaciones entre temperatura de superficie derivada de análisis satelital y datos de estaciones termométricas, solo se puede generar mapas de temperatura ambiental para los meses de la época lluviosa.

BIBLIOGRAFÍA

- Bettencourt, L., & West, G. (2010). A Unified Theory of Urban Living. *Nature*, 465, 912–913.
- CONAPO. (2016). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010. Recuperado el 20 de diciembre de 2015, a partir de http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Zonas_metropolitanas_2010
- Cui, Y. Y., & de Foy, B. (2012). Seasonal Variations of the Urban Heat Island at the Surface and the Near-Surface and Reductions due to Urban Vegetation in Mexico City, 855–868. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0104.1>
- Habitat. (2012). *State of the World's Cities 2010/2011*.
- Holden, Z. a., Klene, A. E., F. Keefe, R., & G. Moisen, G. (2013). Design and evaluation of an inexpensive radiation shield for monitoring surface air temperatures. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180, 281–286. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.06.011>
- INEGI. (2014). Carta topográfica Morelia. Recuperado el 15 de febrero de 2015, a partir de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825206215>

- López, E., Bocco, G., Mendoza, M., & Duhau, E. (2001). Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe. *Landscape and Urban Planning*, 55, 271–285. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(01\)00160-8](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(01)00160-8)
- Mallick, J., Singh, C. K., Shashtri, S., Rahman, A., & Mukherjee, S. (2012). Land surface emissivity retrieval based on moisture index from LANDSAT TM satellite data over heterogeneous surfaces of Delhi city. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19(1), 348–358. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.06.002>
- Maximintegrated. (2015). DS1921G Thermochron iButton Device. En *Maximintegrated* (pp. 1–42).
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y. C., & Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20, 120–128. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4)
- Schwarz, N., Schlink, U., Franck, U., & Großmann, K. (2012). Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators — An application for the city of Leipzig. *Ecological Indicators*, 18, 693–704. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.01.001>

10.3 ISLA DE CALOR URBANA DURANTE LA ÉPOCA HÚMEDA 2015 EN MORELIA, MICHOACÁN

RESUMEN

Estudiamos la variación térmica, la presencia e intensidad de la Isla de Calor Urbana (ICU) durante la época lluviosa (3 de junio al 27 julio 2015; 53 días) en la Ciudad de Morelia, Michoacán en el centro de México. Se emplearon datos de 10 estaciones termométricas automáticas y una estación climática automática distribuidas en los distintos usos de suelo de la ciudad; urbano (n=4), suburbano (n=2), rural (n=3) y áreas verdes (n=2). La ciudad presentó una ICU a lo largo del día con intensidades entre 1.5 y 4.0 ° C que alcanzó su máximo entre las 11:00 y 13:00. Las áreas verdes no mostraron diferencia significativa respecto a las zonas rurales. La ocurrencia de precipitación en el periodo de estudio redujo la intensidad de isla de isla de calor urbana (IICU) aproximadamente 0.3° C. Por otro lado, la oscilación térmica fue significativamente menor para los usos rural y áreas verdes (10.9 y 11.6° C) que fue significativamente menor a urbano y suburbano (13.1 y 12.9° C). Se discute la carencia de áreas verdes al interior de la ciudad así como el que la actividad de los vehículos automotores en la ciudad como fuente de calor que puede favorecer la formación de isla de calor urbana diurna, así como puntos clave de las posibles estrategias de mitigación de la isla de calor urbana en la ciudad de Morelia y ciudades con características similares.

Palabras clave: oscilación térmica, intensidad de isla de calor, calor antropogénico.

ABSTRACT

We studied thermal variation, the occurrence and intensity of Urban Heat Island (UHI) during the wet season (3 June through 27 July 2015; 53 days) in Morelia city, Michoacan in central Mexico. We used data from 10 automated thermometrical and one automated weather station spatially distributed in different land uses; urban (n=4), suburban (n=2), rural (n=3) and green areas (n=2). Results indicate that the city had a day-time UHI with intensities between 1.5 and 4.0° C, which reached its maximum peak between 13:00 and 15:00 hours of local time. The occurrence of precipitation reduced the UHI intensity about 0.3° C. Thermal oscillation was narrower for rural land use (10.7° C) and green areas (11.6° C) than for urban and suburban uses (13.1 y 12.9° C). We discuss the effect of the lack of green areas on the UHI and the automotive vehicle activity within the urban and suburban use classes as heat sources that favors the formation of day-time UHI. We further discuss key points regarding UHI mitigation strategies in Morelia that may apply to similar cities.

Key words: thermal oscillation, heat island intensity, antropogenic heat island.

INTRODUCCIÓN

Muchas áreas urbanas y suburbanas experimentan temperaturas elevadas en comparación con sus entornos rurales. En ciudades de más de un millón de habitantes la temperatura media anual del aire puede ser entre 1°C y 3°C más caliente que su entorno rural inmediato y en una noche clara y tranquila, esta diferencia de temperatura puede llegar a 12°C (EPA, 2012; Oke, 2002). Incluso ciudades y pueblos con menor número de habitantes pueden presentar aumentos en las temperaturas considerables respecto su entorno rural (Oke, 1973, 1982). Este efecto de calentamiento hacia el interior de las ciudades, se conoce como Isla de Calor Urbana (ICU) y es uno de los fenómenos más investigados de la modificación climática dentro de zonas urbanas (Moreno, 1999; Oke, 2002). La ICU se define como el exceso de temperatura frecuentemente observada en las zonas urbanas en comparación con el área circundante (EPA, 2012; Oke, 1973, 1976; Santamouris, 2015).

Actualmente el número de casos y magnitudes del fenómeno ha incrementado por el aumento de la población y terreno ocupados por las zonas urbanas, ya que a partir del año 2008 la mitad de la población humana habita en asentamientos urbanos (UNFPA, 2007). Las áreas urbanizadas constituyen sectores con condiciones particulares dentro de la región climática donde se localizan debido a que el proceso de urbanización conlleva la pérdida de áreas verdes, con la consecuente reducción en la evapotranspiración (Patz et al., 2005; Villanueva-Solis et al., 2013), captura de carbono (Angel et al., 2010), así como una mayor emisión de contaminantes atmosféricos y cambios en la temperatura ambiente. El incremento de las superficies impermeables y el almacenamiento de calor en las estructuras urbanas influyen directamente en la formación de islas de calor (Golany, 1996) ya que los materiales que conforman el entorno urbano absorben la radiación solar y disipan parte del calor acumulado a través de convección y radiación, aumentando la temperatura ambiente (Alchapar et al., 2012). Se sabe que la distribución espacial de la ICU se relaciona fuertemente con la densidad de edificación y genera un perfil longitudinal de temperatura en forma de campana donde las máximas temperaturas se registran generalmente en las partes interiores (centro) de las ciudades (Oke, 2002; Stone and Norman, 2006). Actualmente existe debate sobre el efecto de la urbanización y las ICUs a escala global, pero algunos investigadores señalan que los centros urbanos han desempeñado un papel clave en el aumento de la temperatura planetaria por el aporte de gases de efecto invernadero. Según el informe mundial sobre asentamientos humanos del 2011 de la ONU, se estima que las ciudades aportan entre un 40% y el 70% del total de los gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático (ONU, 2011).

La mayoría de los estudios de ICU distinguen dos principales tipos de isla de calor: La isla de calor urbana atmosférica (ICUa) la cual se corresponde al registro de una mayor temperatura en la capa de aire que cubre la ciudad respecto de sus alrededores (EPA, 2012; Voogt and Oke, 2003) y la Isla de calor urbanas superficiales (ICUs) las cuales corresponde a las altas temperaturas de emisión que alcanzan las diferentes estructuras y cuerpos urbanos y que son captados directamente por sensores infrarrojos de satélites o cámaras térmicas (Sarricolea et al., 2008).

Respecto a la variación temporal de la ICU, Sarricolea et al. (2008) mencionan que no existe un consenso sobre la variación estacional de la ICU ya que la estación de máxima intensidad de isla de calor difiere dependiendo de la localización geográfica de la ciudad.

Sin embargo, para el caso de las regiones tropicales y subtropicales, las diferencias entre las intensidades de isla de calor (IICU) entre el invierno y el verano han demostrado ser menos significativas que las diferencias entre la temporada húmeda-seca (Arnfield, 2003; Voogt, 2004). Otros autores señalan que para el caso de la isla de calor atmosférica, ésta se presenta con mayor intensidad bajo condiciones de poco viento y cielo despejado, sobre todo por la noche cuando las diferencias de enfriamiento se maximizan entre localidades urbanas y rurales circundantes (EPA, 2012; Mills, 2004; Oke, 2002).

En el caso de México, la mayor parte de su población urbana se concentra en el centro del país (INEGI, 2005) donde climáticamente se presentan tres estaciones marcadas: fría-seca (noviembre-febrero), cálida-seca (marzo-abril) y cálida-lluviosa (mayo-octubre) (Cui y de Foy, 2012). Trabajos realizados en las principales ciudades en la zona (Cd. de México y Guadalajara) han encontrado que la mayor IICU se produce durante la estación cálida-seca (Jauregui, 1997; Tereshchenko and Filonov, 2001). Sin embargo existen discrepancias entre los estudios realizados en la época lluviosa ya que en la Cd. de México la ICU estuvo presente durante todo el año incluida la época lluviosa mientras que para Guadalajara se registra la presencia del fenómeno de isla fría durante la época lluviosa donde se presentan temperaturas mas bajas en las zonas urbanas con respecto de las áreas rurales (Tereshchenko and Filonov, 2001).

Por lo anteriormente expuesto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la variación térmica del aire entre usos de suelo urbano, suburbano, áreas verdes y rurales durante la estación lluviosa (junio-julio) con el fin de detectar la posible presencia e intensidad del fenómeno de isla de calor urbana atmosférica en la ciudad de Morelia, Michoacán. Ya que, como se mencionó previamente en los estudios realizados en las principales ciudades de la zona se han encontrado discrepancias en la ocurrencia del fenómeno de ICU durante la época lluviosa.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la ciudad de Morelia, Michoacán (Figura 1) y su entorno periurbano inmediato. La ciudad se encuentra en el municipio de Morelia, localizado en la región centro-norte del estado de Michoacán. El área metropolitana de Morelia abarcaba una superficie de 111.4 km² para el año 2010 (INEGI, 2014) , con una población de 829,625 (CONAPO, 2016). La zona urbana de la ciudad de Morelia se encuentra ubicada entre los paralelos 19.62° y 19.79° de latitud norte y los meridianos 101.33° y 101.07° de longitud oeste, con una altitud promedio de 1,940 msnm.

El tipo de clima de la zona de acuerdo con la clasificación de Köppen modificado por Garcia (1987) es Cb(w1)(w)(i')g; templado con lluvias en verano con poca oscilación térmica y el mes mas cálido es anterior al solsticio de verano (mayo) (García, 2004).

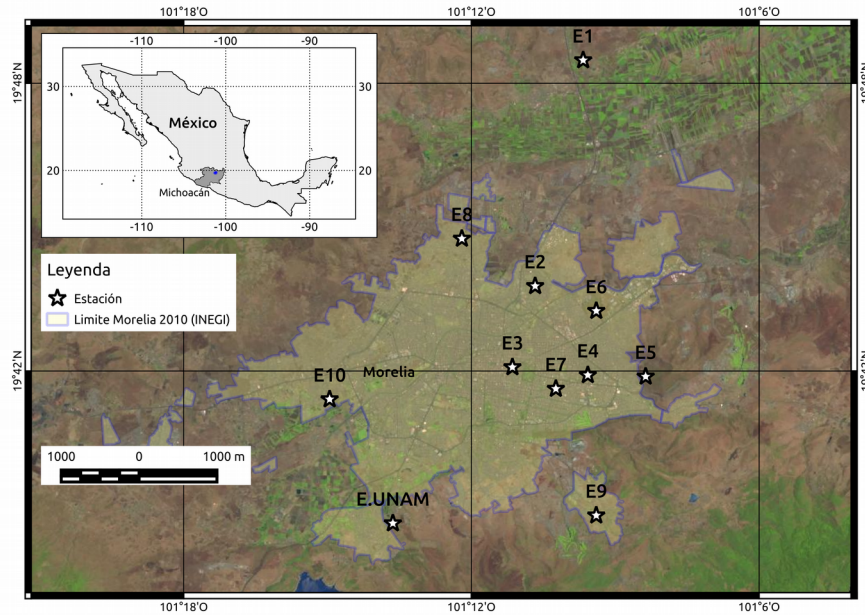


Figura 1. Ubicación del área de estudio con imagen satelital de falso color Landsat 8 (octubre 2014), límite de la traza urbana de Morelia (INEGI, 2010), localización de las estaciones termométricas automáticas (E1 a E10) y estación meteorológica automática (E.UNAM).

De acuerdo con el observatorio meteorológico 16080 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2016) para el periodo 1951-2010 la temperatura promedio anual fue de 18.9 °C, siendo enero y mayo los meses mas frío y caluroso con temperaturas mensuales promedio de 15.7° y 21.9° C respectivamente. La precipitación promedio anual es de 794.4 mm, con diciembre y julio los meses mas seco y lluvioso respectivamente con láminas mensuales promedio de 3.7 mm y 173.7 mm. La precipitación es fuertemente estacional con una marcada diferencia entre la época lluviosa y la seca. La primera abarca de finales de mayo a octubre, con mayor precipitación en junio y julio, mientras que en agosto, es frecuente que se presente sequía intraestival o canícula. La época seca ocurre de noviembre a mayo (Figura 2).

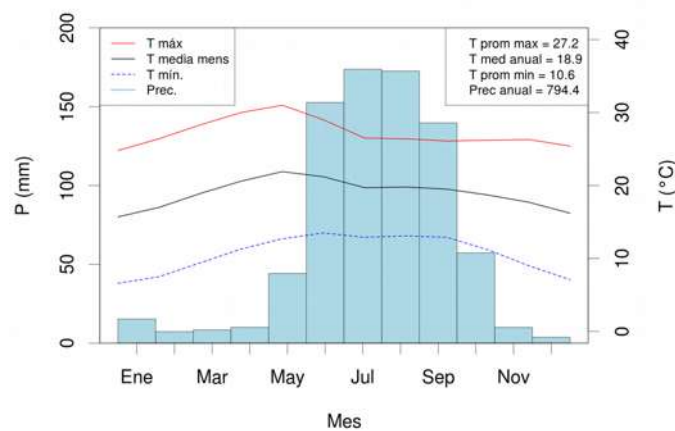


Figura 2. Climograma para la ciudad de Morelia. Precipitación mensual y temperaturas máxima, media y mínima mensuales. El recuadro muestra promedios anuales para temperatura máxima, media y mínima y precipitación total anual. Datos del observatorio meteorológico 16080 del SMN (SMN, 2016).

MATERIALES Y MÉTODOS

Registros de temperatura

Para la toma de datos de temperatura se emplearon 10 estaciones termométricas automáticas digitales y una estación meteorológica automática. Las estaciones termométricas miden y registran la variable de temperatura ambiente. Éstas comprenden tres componentes (Figura 3). El primero es un sensor termométrico digital automático iButton® ThermoChron modelo DS1921G (Maximintegrated, 2015) (Figura 3a) con precisión de 0.06 °C (configurado a 12 bits), capacidad de almacenamiento de 2048 registros, con rango de medición entre los -40°C y +85 °C y frecuencia de registro entre 1 y 255 minutos (4.25 horas). La programación del sensor se realiza desde una computadora personal empleando dispositivo adaptador que se conecta a un puerto USB (Figura 3c). Estos sensores han sido ampliamente utilizados en aplicaciones incluyendo el monitoreo de la temperatura del aire (Brower et al., 2011). Sin embargo, para el funcionamiento correcto de estos sensores en aplicaciones meteorológicas, es necesario colocar los sensores dentro de escudos solares para evitar la toma incorrecta de datos asociada a; daños mecánicos, humectación de la superficie del sensor y así evitar mediciones en condiciones de “bulbo húmedo”, también evitar la acumulación de partículas y desarrollo de biopelículas (algas o líquenes) sobre el sensor y minimizar el error por calentamiento derivado de la exposición a la radiación solar directa.

La segundo componente es un escudo solar de policarbonato celular recubierto con cinta metálica reflejante construido *ex profeso* de acuerdo con las especificaciones y diseño de (Holden et al., 2013) (Figura 3d).

El tercer componente es una base de soporte de tubo galvanizado (5 cm diámetro) y concreto hidráulico también construida *ex profeso*. La base permite instalar el escudo solar con el sensor térmico digital en su interior a 1.5 m de altura sobre la superficie del suelo y proporciona estabilidad mecánica (Figura 3b y 3e).

Las estaciones termométricas fueron calibradas empleando como referencia una estación meteorológica automática Vaisala (WXT510) y un perfilador termohidrométrico automático digital (Ruiz, 2015) en el área dedicada a la estación meteorológica del Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en Morelia (19° 41' 22.8" N, 101° 14' 58.57", a una altitud de 1,837 msnm). El error medio cuadrático de los sensores fue de 0.43 ± 0.12 °C.

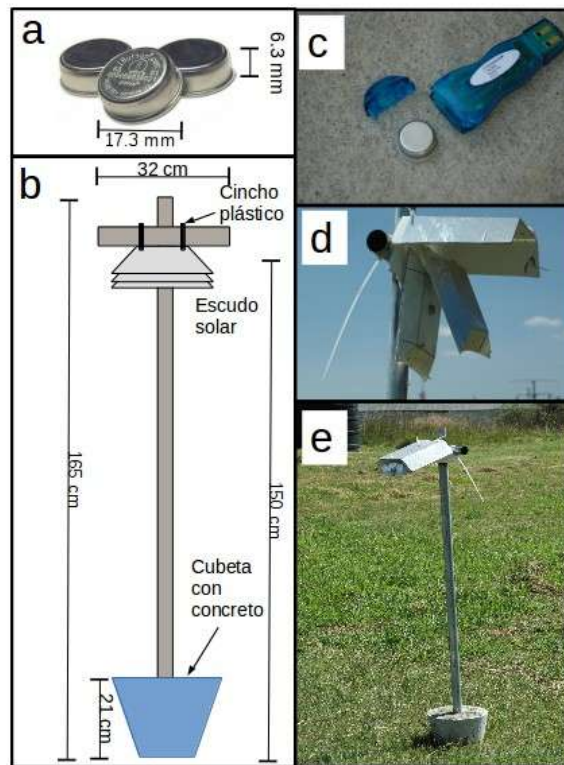


Figura 3. Estación termométrica automática. a) sensor de temperatura digital automático iButton® Thermochron, b) esquema y dimensiones de la estación termométrica con base, c) sensor de temperatura y accesorio para programación y descarga de datos USB para PC, d) escudo solar abierto mostrando la ubicación del sensor de temperatura, e) aspecto general de la estación termométrica y su base de soporte desplegada en campo.

La estación meteorológica automática considerada en este estudio, se encuentra instalada en el Campus Morelia de la UNAM (Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural). Esta estación modelo DAVIS Vantage Pro tiene resolución temporal de adquisición de datos de 10 minutos y los datos meteorológicos se encuentran disponibles en línea; <http://132.248.6.186/morweather/daily.htm>. Los datos meteorológicos fueron descargados en tiempo real automáticamente empleando el manejador de procesos automatizados *crontab* para Linux (Debian/Ubuntu) y un programa para la descarga y lectura de los archivos dentro del ambiente de programación estadística R v 3.1.1 invocado para correr de forma automática como *background* ó *daemon* de Linux empleando un script Linux-Shell dentro de una computadora PC con sistema operativo Linux Ubuntu 11.04.

Usos del suelo y despliegue de estaciones

Se realizó una categorización de uso del suelo urbano empleando la información de plan de desarrollo municipal del Instituto Municipal de Desarrollo Urbano de Morelia (IMDUM, 2012) e imágenes satelitales SPOT 5 del año 2013. La clasificación se realizó adaptando y generalizando el modelo propuesto por (Oke, 2006) para usos y coberturas de zonas climáticas en las ciudades que se basa en la densidad de urbanización y rugosidad de los

edificios en unidades territoriales de 1 Km². El modelo de clasificación se generalizó empleando cuatro clases: Urbano (>85% de cobertura edificada), suburbano (entre el 84 y el 40% de cobertura edificada), rural (menos del 39% cobertura edificada) y áreas verdes grandes (parques, áreas verdes y baldíos dentro de la ciudad superiores a 5 ha). La interpretación y clasificación de las imágenes satelitales SPOT 5 se realizó empleando herramientas estándar de procesamiento de Sistemas de Información Geográfica (SIG) utilizando el programa de código abierto QGIS v 2.4.0-Chugiak.

El despliegue de estaciones termométricas se realizó para abarcar los diferentes usos del suelo con al menos dos repeticiones cada uno (Figura 1 y cuadro 1) y estas se programaron para realizar registros cada 30 minutos.

Cuadro 1. Ubicación y uso del suelo para las diferentes estaciones empleadas en este estudio.

Clave de estación	Ubicación (coordenadas, longitud oeste / latitud norte)	Altitud (m.s.n.m.)	Uso del suelo	Observaciones
E1	101° 9' 40.0"/19° 48' 28.8"	1900	Rural	Edificación aislada adyacente a campos de cultivo y matorral
E2	101° 10' 40.2"/19° 43' 46.3"	1907	Urbano	Alta densidad
E3	101° 11' 8.6"/19° 42' 4.8"	1912	Urbano	Centro histórico de la ciudad, edificaciones de cantera e intensa actividad comercial
E4	101° 9' 34.2"/19° 41' 54.9"	1942	Urbano	Casas de interés social
E5	101° 8' 21.9"/19° 41' 53.1"	2107	Área verde	Área natural protegida "Cerro de Punhuato" adyacente a área urbana.
E6	101° 9' 23.7"/19° 43' 15.3"	1948	Área verde	Parque ecológico Cd. Industrial, rodeado de uso urbano y suburbano.
E7	101° 10' 14.2"/19° 41' 37.8"	1914	Urbano	Zona residencial cercana al centro de la ciudad
E8	101° 12' 11.9"/19° 44' 45.6"	1902	Suburbano	Densidad habitacional moderada, terrenos baldíos y casas en construcción
E9	101° 9' 23.7"/19° 38' 59.4"	2111	Rural	Adyacente a campos de cultivo y zonas forestales
E10	101° 14' 57.4"/19° 41' 24.7"	1895	Suburbano	Adyacente zona con densidad media, dentro de un centro de investigación con baja densidad de construcción.
E.UNAM	101° 13' 38.2"/ 19° 38' 49.5"	1964	Rural	Edificaciones aisladas con vegetación arbórea (eucaliptos) adyacente.

Análisis de datos

El análisis de datos comprendió dos fases. La primera fue la estructuración coherente de las bases y el establecimiento de una línea de tiempo única con intervalos de una hora. La base de datos general abarcó 53 días, del 3 de junio de 2015 al 27 de julio del mismo año sin interrupción.

Para la estación meteorológica (UNAM), se realizó la agregación de temperatura externa mediante promedio horario de los datos registrados cada 10 minutos. En el caso de las estaciones termométricas se realizaron las agregaciones de temperatura también con el promedio horario de los datos registrados cada 30 min. Esta tarea se realizó empleando las funciones *endpoints* y *period.apply* del paquete *XTS* v. 0.9-7 (Ryan and Ulrich, 2015) para el ambiente de programación R v 3.1.1. Se obtuvieron los valores de temperatura máxima, mínima y promedio horaria así como la oscilación térmica (diferencia entre la temperatura máxima y mínima) diaria para cada estación. Además se obtuvo la intensidad de la isla de calor urbana (IICU) que se define como la diferencia de temperatura promedio entre un ambiente urbano y su área rural circundante (Memon et al., 2009; Oke, 2002). En este estudio se obtuvo a partir de la diferencia entre los datos promedio de las estaciones urbanas (n=4) y rurales (n=3).

Por otro lado se realizaron comparaciones entre los diferentes usos del suelo así como el efecto de la hora del día y la ocurrencia de precipitación sobre la temperatura para los diferentes usos del suelo. Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) de una y dos vías (Chambers et al., 1992) así como pruebas de Diferencia Honesta Significativa de Tukey (TukeyDHS) (Miller, 1981; Yandell, 1997). En el presente trabajo, solo se muestran y discuten resultados significativos 95% o mayor ($\alpha \leq 0.5$).

RESULTADOS

Temperatura y uso del suelo

El análisis de datos evidenció la ocurrencia de una isla de calor urbana para la ciudad de Morelia durante el periodo estudiado en la época lluviosa (3 de junio al 27 de julio de 2015) ya que la diferencia entre las temperaturas promedio de los usos urbano y rural fue de 2 °C (Figura 4).

El análisis de varianza ($F=111.1$, $gl=10$, $p<0.001$) y la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) indicaron la existencia de diferencia significativa para la temperatura entre las distintas estaciones. Al agrupar las estaciones por uso de suelo el análisis de varianza de dos vías indicó que existe un efecto del uso de suelo ($F=252$, $gl=3$, $p<0.001$) y de la hora del día ($F = 1384$, $gl = 23$, $p < 0.001$) sobre la temperatura, además la interacción entre estos factores resultó significativa ($F = 7.368$, $gl = 69$, $p < 0.001$).

El uso de suelo urbano presentó la temperatura mas alta (20.4 ± 0.06 °C), seguido por las zonas suburbanas las cuales no presentan diferencias significativas respecto del uso urbano (19.8 ± 0.08 °C), mientras que las zonas rurales (18.3 ± 0.06 °C) y áreas verdes (18.1 ± 0.08 °C) mostraron temperaturas significativamente mas bajas respecto a los entornos urbanizados, sin embargo no presentaron diferencias significativas entre ellas (Figura 4).

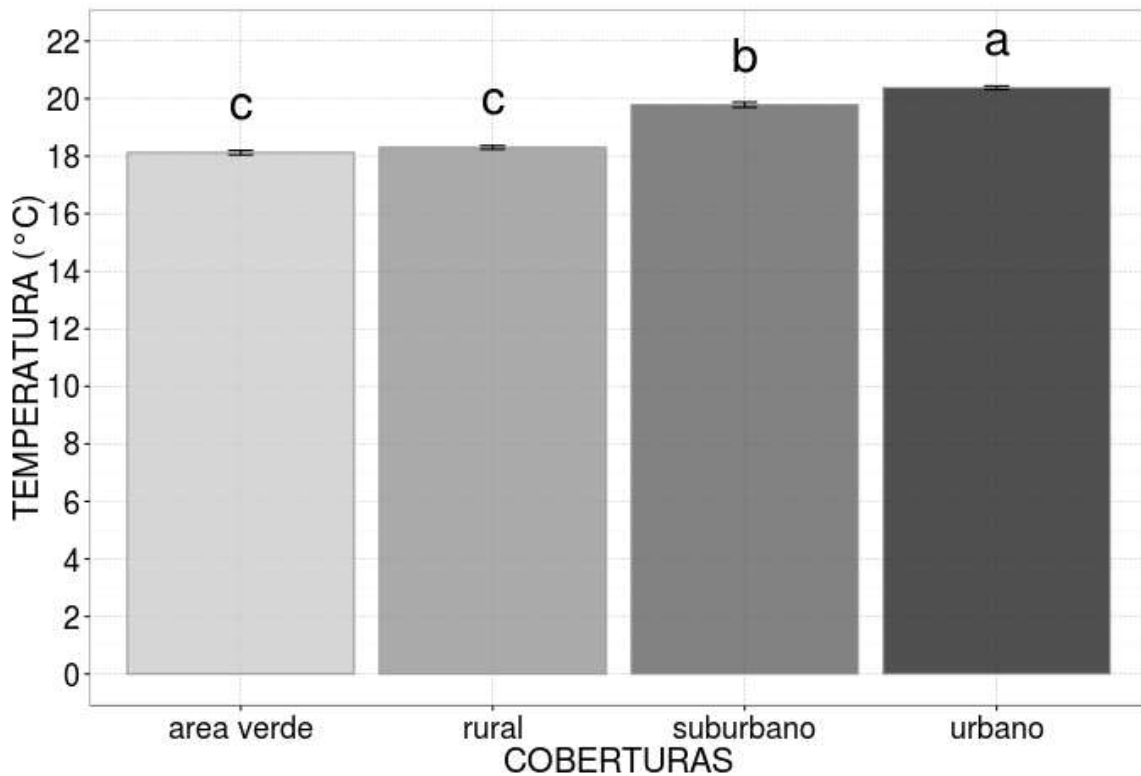


Figura 4. Comparación de temperaturas promedio entre diferentes usos de suelo en la ciudad de Morelia para la época lluviosa de 2015 (3 de junio al 27 de julio de 2015). Se muestra el error estándar de la media, letras distintas indican diferencia significativa DHS Tukey ($\alpha = 0.05$).

Variación horaria de la temperatura

La temperatura de los usos de suelo urbano y suburbano no tuvieron diferencia entre las 14:00 y las 20:00 horas, sin embargo entre las 21:00 horas y hasta las 13:00 horas estos usos presentan diferencias significativas en su temperatura ambiental (cuadro 2, Figura 5). Por otro lado las áreas verdes no mostraron diferencias respecto de las zonas rurales entre las 2:00 y las 18:00 horas, sin embargo estas zonas presentan diferencias entre las 19:00 y las 1:00 horas a excepción de las 00:00 horas.

Las áreas verdes y las zonas rurales mostraron diferencias de temperatura respecto de las zonas urbanas y suburbanas prácticamente todo el día a excepción de las 19:00 horas en donde el uso de suelo suburbano y el rural no mostraron diferencias en los registros de temperatura.

La mayor diferencia entre zona rural y urbana fue de 4 °C y se presentó a las 13:00 horas, mientras que la menor diferencia ocurre a las 19:00 horas y fue de tan solo 1 °C.

Cuadro 2. Temperaturas horarias promedio para diferentes usos del suelo en la ciudad de Morelia. Entre paréntesis se presenta la desviación estándar. Letras distintas indican diferencia estadística significativa ($\alpha \leq 0.05$) (TukeyDHS).

Hora	Urbano	Suburbano	Área verde	Rural
0	17.4 (0.1) ^{a*}	16.8 (0.1) ^{b*}	15.5 (0.1) ^{c*}	15.9 (0.1) ^{c*}
1	17.0 (0.1) ^{a*}	16.5 (0.1) ^{b*}	15.1 (0.1) ^{c*}	15.6 (0.1) ^{d*}
2	16.7 (0.1) ^{a*}	16.1 (0.1) ^{b*}	14.9 (0.1) ^{c*}	15.2 (0.1) ^{c*}
3	16.3 (0.1) ^{a*}	15.8 (0.1) ^{b*}	14.5 (0.1) ^{c*}	14.8 (0.1) ^{c*}
4	16.0 (0.1) ^{a*}	15.5 (0.1) ^{b*}	14.4 (0.1) ^{c*}	14.6 (0.1) ^{c*}
5	15.8 (0.1) ^{a*}	15.3 (0.1) ^{b*}	14.2 (0.1) ^{c*}	14.4 (0.1) ^{c*}
6	15.6 (0.1) ^{a*}	15.2 (0.1) ^{b*}	14.0 (0.1) ^{c*}	14.2 (0.1) ^{c*}
7	16.1 (0.1) ^{a*}	15.6 (0.1) ^{b*}	14.3 (0.1) ^{c*}	14.5 (0.1) ^{c*}
8	18.1 (0.1) ^{a*}	17.2 (0.1) ^{b*}	15.6 (0.1) ^{c*}	15.9 (0.1) ^{c*}
9	20.4 (0.2) ^{a*}	19.6 (0.2) ^{b*}	17.3 (0.1) ^{c*}	17.8 (0.2) ^{c*}
10	23.1 (0.2) ^{a*}	22.1 (0.2) ^{b*}	19.5 (0.2) ^{c*}	19.5 (0.2) ^{c*}
11	25.0 (0.2) ^{a*}	24.2 (0.2) ^{b*}	21.5 (0.2) ^{c*}	21.2 (0.2) ^{c*}
12	26.4 (0.2) ^{a*}	25.3 (0.3) ^{b*}	22.9 (0.2) ^{c*}	22.6 (0.2) ^{c*}
13	27.2 (0.2) ^{a*}	26.1 (0.3) ^{b*}	23.9 (0.2) ^{c*}	23.2 (0.2) ^{c*}
14	27.0 (0.2) ^{a*}	26.4 (0.3) ^{a*}	24.2 (0.2) ^{b*}	23.5 (0.2) ^{b*}
15	26.7 (0.2) ^{a*}	26.3 (0.3) ^{a*}	24.4 (0.3) ^{b*}	23.4 (0.2) ^{b*}
16	24.9 (0.3) ^{a*}	24.8 (0.4) ^{a*}	22.8 (0.3) ^{b*}	22.8 (0.2) ^{b*}
17	23.5 (0.2) ^{a*}	23.1 (0.4) ^{a*}	21.8 (0.3) ^{b*}	21.7 (0.2) ^{b*}
18	21.8 (0.2) ^{a*}	21.7 (0.3) ^{a*}	20 (0.3) ^{b*}	20.5 (0.2) ^{b*}
19	20.3 (0.2) ^{a*}	20 (0.3) ^{ac*}	18.4 (0.2) ^{b*}	19.4 (0.2) ^{c*}
20	19.4 (0.1) ^{a*}	18.9 (0.2) ^{a*}	17.3 (0.2) ^{b*}	18.2 (0.2) ^{c*}
21	18.9 (0.1) ^{a*}	18.3 (0.2) ^{b*}	16.8 (0.2) ^{c*}	17.4 (0.2) ^{d*}
22	18.2 (0.1) ^{a*}	17.7 (0.2) ^{b*}	16.2 (0.1) ^{c*}	16.8 (0.1) ^{d*}
23	17.7 (0.1) ^{a*}	17.2 (0.1) ^{b*}	15.7 (0.1) ^{c*}	16.4 (0.1) ^{d*}

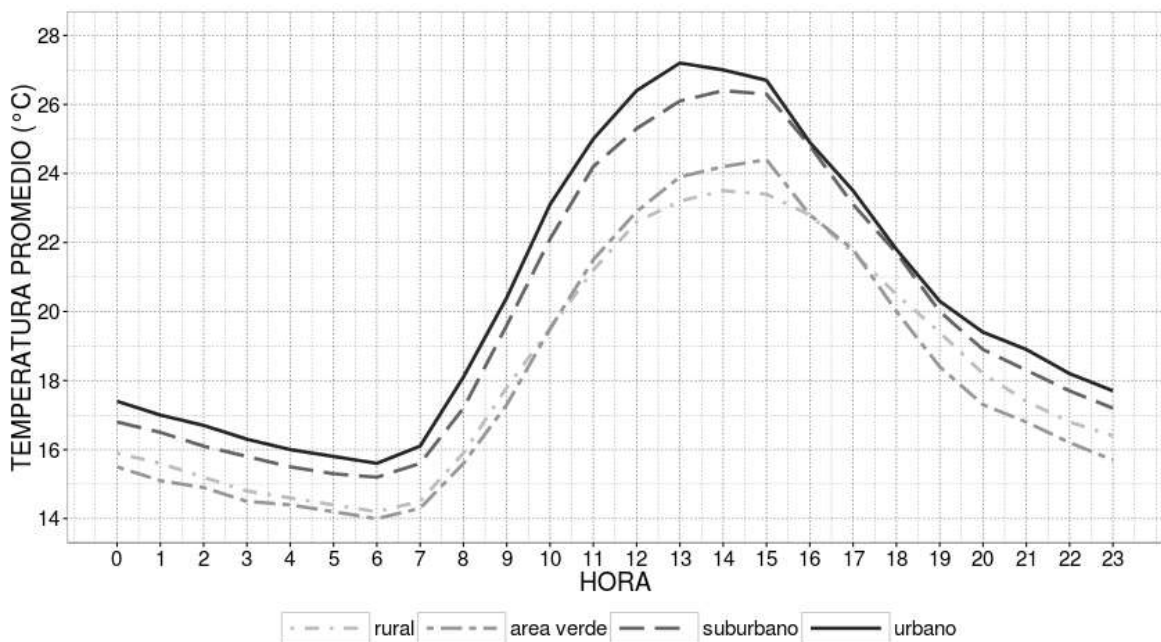


Figura 5. Variación diaria de la temperatura promedio horaria para cuatro usos del suelo en la ciudad de Morelia, durante la época lluviosa (3 de junio al 27 de julio de 2015).

Oscilación térmica

Las áreas verdes y las zonas rurales no presentaron diferencias en la oscilación térmica, además las zonas rurales presentaron la menor oscilación térmica a lo largo del día (10.9 °C) seguidas por las áreas verdes (11.6 °C). De la misma manera las zonas urbanas y suburbanas no presentaron diferencia significativa en la oscilación térmica, sin embargo el uso de suelo con la oscilación térmica promedio mas elevada fue el urbano (13.1 °C) seguido por las zonas suburbanas (12.9 °C) (Cuadro 3). Por otro lado el grupo compuesto por las áreas verdes y las zonas rurales presentaron diferencias respecto al grupo de las zonas urbanas y suburbanas (Cuadro 3).

Cuadro 3. Oscilación térmica para cuatro usos del suelo en Morelia, México durante la época lluviosa (3 de junio al 27 de julio de 2015). Distinta letra indica diferencia significativa para la prueba de TukeyDHS ($p < 0.05$)

Uso	Mínimo	Media	Máximo	Desviación Estándar
Rural	4.9	10.9 ^{a*}	17.0	0.3
Área verde	6.2	11.6 ^{a*}	16.5	0.3
Suburbano	6.5	12.9 ^{b*}	19.0	0.3
Urbano	6.6	13.1 ^{b*}	19.0	0.3

Intensidad horaria de la isla de calor

La IICU fue de 2.0 °C en promedio, sin embargo presentó importantes variaciones a lo largo del día y fue mas intensa en el periodo comprendido entre las 10:00 y 15:00 horas con intensidades superiores a los 3 °C (Figura 6). El pico de IICU ocurrió sistemáticamente a las 13:00 horas entre el uso urbano y rural con valores de 4 °C, seguido por las 11:00 y 12:00 horas con valores de IICU de 3.8 °C. La menor IICU promedio se detectó a las 19:00 y fue de 1 °C.

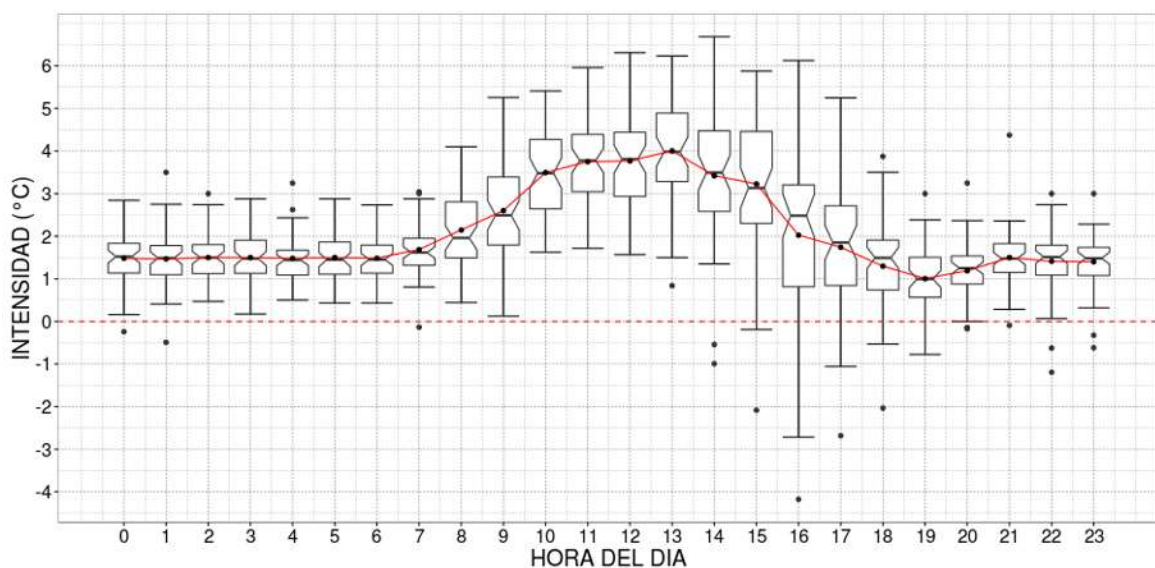


Figura 6. Variación horaria de Intensidad de Isla de Calor Urbana (IICU).

Efecto de la precipitación en la temperatura e ICU

El análisis de varianza realizado para comparar las temperaturas de los diferentes usos con ocurrencia de eventos de precipitación ($F=194.6$, $gl=3$, $p<0.05$) y sin ocurrencia de eventos de precipitación ($F=45.07$, $gl=3$, $p<0.05$), mostró diferencias significativas en las temperaturas en todos los usos del suelo. La prueba de TukeyDHS ($p < 0.05$) mostró que para ambos tratamientos (con y sin eventos de precipitación) no existen diferencias entre los usos de suelo rural y áreas verdes mientras que ambas zonas son diferentes a los usos de suelo urbano y suburbano los cuales son también diferentes entre sí.

Las temperaturas mas altas se presentan los días donde no hay eventos de precipitación en el uso de suelo urbano, mientras que las temperaturas mas bajas se presentaron los días en que ocurren eventos de precipitación en las áreas verdes (Cuadro 4). Para el caso de las coberturas rurales la presencia de precipitación reduce en promedio la temperatura $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. En las áreas verdes esta se reduce $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en las zonas suburbanas y urbanas la temperatura disminuye $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente (Cuadro 4).

Cuadro 4. Efecto de la precipitación en las temperaturas promedio.

COBERTURA	PRECIPITACIÓN	TEMPERATURA PROMEDIO ($^{\circ}\text{C}$)	SD
área verde	Con precipitación	18.0	0.1
	sin precipitación	19.0	0.2
rural	Con precipitación	18.2	0.1
	sin precipitación	19.0	0.2
suburbano	Con precipitación	19.7	0.1
	sin precipitación	20.6	0.2
urbano	Con precipitación	20.2	0.1
	sin precipitación	21.3	0.2

Por otro lado, los eventos de precipitación también tuvieron un efecto sobre la intensidad promedio horaria de isla de calor, en donde se presentaron intensidades mas bajas los días con eventos de precipitación ($F=623.7$, $gl=1$, $p<0.05$) respecto de los días sin presencia de eventos de precipitación (Figura 7).

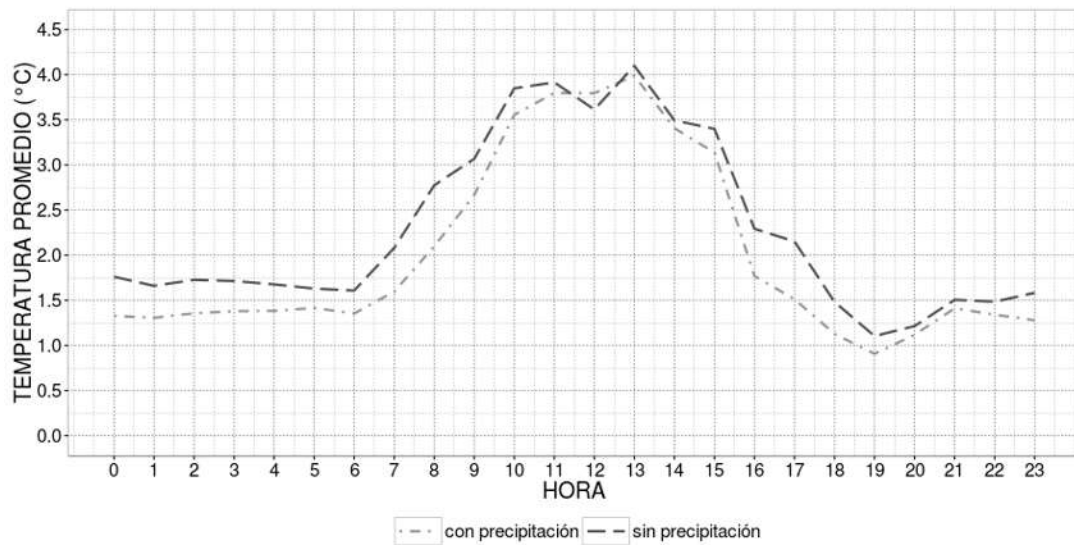


Figura 7. Efecto de la precipitación en la intensidad de isla de calor urbana (ICU).

DISCUSIÓN

Presencia de la isla de calor urbana durante la época lluviosa.

En este trabajo pudimos reconocer la presencia del fenómeno isla de calor urbana en la ciudad de Morelia durante la época lluviosa de 2015. Se presentaron temperaturas más bajas en las zonas rurales respecto a las zonas urbanas de la ciudad. La ICU tuvo una intensidad promedio de 2 °C. La información indica que en general, la precipitación tiende a reducir la ICU debido al aumento de la humedad relativa en los entornos urbanos. Esos entornos tienden a tener tasas de evaporación más altas (Santamouris, 2015) lo que se traduce en una menor temperatura superficial y del aire debido al uso de energía para cambio de estado del agua (calor latente) que está asociado a un fenómeno de “refrigeración por evaporación” (Kim and Baik, 2002; Ballinas y Barradas, 2016).

La presencia del fenómeno de ICU durante la época lluviosa también ha sido reportado en ciudades del centro de México, como la Cd. de México (2240 msnm) por Jauregui et al. (1992) para la temporada lluviosa. Para la ciudad de Guadalajara (1540 msnm) se ha reportado un fenómeno inverso a la ICU, la presencia de isla fría (Tereshchenko and Filonov, 2001) en los meses de junio y julio.

Causas de la isla de calor en Morelia

El análisis de los datos de temperatura media, conforme a la distribución de las estaciones termométricas permitió visualizar que los registros de mayor temperatura se ubicaron en el interior de la ciudad, mientras que las temperaturas menores se localizan en la periferia. Estos resultados corroboran un efecto de la urbanización en el incremento de las temperaturas hacia el interior de la ciudad de Morelia. Este incremento es debido principalmente a tres factores:

- *La concentración de actividades que emiten calor antropogénico.* En la ciudad de Morelia la fuente principal de calor antropogénico son los vehículos automotores ya que existen pocas zonas industriales las cuales ocupan menos del 0.9 % del área urbanizada (IMDUM, 2012). Sin embargo el parque vehicular se estimó en 251 376 vehículos activos para 2015 de acuerdo con los datos proporcionados por el Estudio de Emisiones y Actividad Vehiculares en Morelia, Michoacán (INECC, 2010).
- *Falta de vegetación y áreas verdes.* Las áreas con vegetación actúan como un agente refrigerante y regulador de la temperatura ambiente a través de la evapotranspiración (Oke, 1995). La liberación de vapor de agua a través de la plantas incrementa la humedad del aire y disminuye la temperatura del aire (Ballinas and Barradas, 2016). Sin embargo en las ciudades, por lo general, los procesos de transpiración son reducidos. Esto se debe a que las zonas que producen humedad ambiental como áreas verdes suelen ser pequeñas. En el caso de la ciudad de Morelia las áreas verdes son pocas en número y tamaño ya que ocupan menos del 1.5% de la zona urbana (IMDUM, 2012).
- *Las propiedades térmicas de los materiales de construcción de las zonas urbanas.* El concreto y asfalto son los principales materiales de construcción empleados ampliamente en el interior de las ciudades, los cuales tienen baja reflectancia y una alta absorbancia (Gartland, 2008) e inercia térmica (Chen et al., 2008). Estos materiales contrastan con aquellos presentes en las áreas rurales donde los principales materiales que se encuentran sobre el terreno son el suelo y la vegetación. Las propiedades térmicas de los materiales regulan el intercambio de energía que se da en el contacto entre la superficie y la capa inferior de la atmósfera (Weng, 2009) donde normalmente las áreas sin construcciones y con vegetación tienen temperaturas superficiales más frías, las cuales contribuyen a temperaturas de aire más frío respecto a las áreas urbanas (Voogt and Oke, 2003). Es importante aclarar que para el caso de Morelia la mayor parte de las construcciones tienen un uso habitacional-comercial (72.5%) hechas en su mayoría a base de concreto, mampostería y con densidades de edificación entre 13 viv/ha y 130 viv/ha (IMDUM, 2012).

Los resultados indican que para el caso de las zonas urbanas y suburbanas, las diferencias de temperatura resultaron significativas fueron de 0.6 °C en promedio. Estas diferencias se ha corroborado en otros estudios como el realizado por Yamashita (1996) en Tokio, donde se encontraron diferencias de temperatura de entre 1.0–1.5°C en los meses de verano entre estas coberturas. Otro estudio en Granada España mostró que la intensidad de isla de calor se incrementa hasta 2 °C mas sobre los terrenos mas densamente edificados (Montavez et. al., 2000).

Variación horaria de la temperatura e intensidad de isla de calor

Estudios previos en ciudades en latitudes medias, reportan que la isla de calor se presenta generalmente durante la noche (Jauregui, 1997; Kim and Baik, 2002; Memon et al., 2009; Montavez et al., 2000). Oke (1982) menciona que este comportamiento se puede explicar debido a que la velocidad de enfriamiento durante la noche es más alta en las zonas rurales

en comparación con las zonas urbanas. Sin embargo, este modelo conceptual se verifica bajo condiciones de viento calmas y sin nubosidad (Oke, 2002). En el presente estudio las observaciones se realizaron durante la época de lluvias y antes del periodo de sequía intraestival conocido como “canícula” que ocurre normalmente en el mes de agosto (CONAGUA, 2015). Por lo que para el periodo analizado se presentaron precipitaciones el 87.7% de los días. Estas condiciones pueden modificar la variación temporal de la IICU respecto al modelo general propuesto por Oke (1982) ya que contrario a lo mencionado por diversos autores, el fenómeno de isla de calor se presentó a lo largo del día y con mayores intensidades durante el periodo diurno (Figura 8).

Respecto a la formación de islas de calor durante el día en el periodo lluvioso para el centro de México, Jauregui (1997) señala que estas son causadas debido a la mayor pérdida de calor en los entornos rurales y por ello mayor “refrigeración” de las superficies. Los eventos de lluvia que ocurren en el periodo nocturno en los sitios urbanos y rurales disminuyen los contrastes térmicos entre estas zonas, mientras que durante el día los niveles de humedad guardados en el suelo de las zonas rurales son más altos, respecto de los sitios urbanos donde la humedad es poca y superficial y esta se evapora más rápidamente provocando que las superficies urbanas tiendan a calentarse más rápidamente una vez que el agua se ha secado. Es esto lo que provoca una mayor diferencia en las temperaturas de los sitios rurales respecto de los ambientes urbanos.

Las diferencias en los patrones de calentamiento mencionadas previamente se pueden observar en la figura 8, en donde las temperaturas más bajas ocurren a las 6:00 horas poco antes del amanecer en todos los usos de suelo debido principalmente al enfriamiento radiativo, sin embargo a partir de la salida del sol (aproximadamente a las 6:30 horas) las temperaturas se elevan alcanzando su máximo en las zonas urbanas y suburbanas a las 13:00 y 14:00 horas respectivamente, mientras que las zonas rurales y de áreas verdes, se alcanzó la temperatura máxima a las 14:00 y 15:00 horas. Esto es entre una y dos horas después que las zonas urbanas.

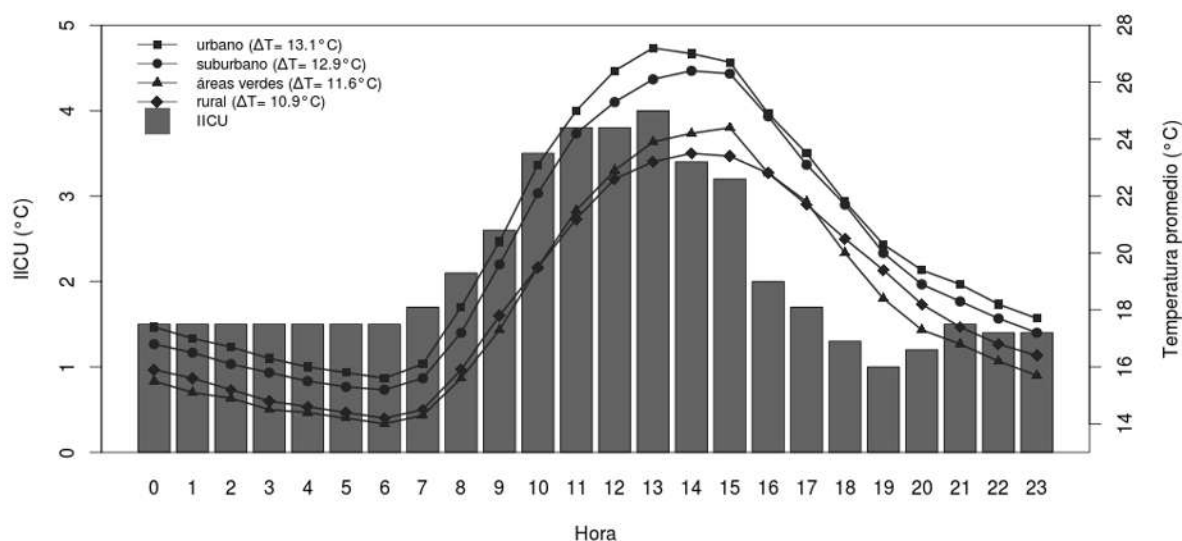


Figura 8. Temperaturas promedio horarias de los diferentes usos de suelo e IICU horaria. Se muestra en la leyenda la oscilación térmica promedio por uso de suelo. $\Delta T = T_{max} - T_{min}$.

Por otro lado también existen diferencias en las oscilaciones térmicas entre las zonas rurales y urbanas. Las zonas rurales tienen 2.2 °C menos variación entre las temperaturas máximas y mínimas respecto a las zonas urbanas. De forma que las zonas rurales tienen temperaturas más homogéneas durante el transcurso del día ya que el suelo húmedo requiere más energía para aumentar su temperatura y se produce el fenómeno de evaporación directa desde la superficie del suelo generándose un enfriamiento por el cambio de estado del agua (calor latente) (Lee and Baik, 2010; Santamouris, 2015).

CONCLUSIONES

Contrario a lo esperado, en el presente trabajo se detectó el fenómeno de isla de calor urbana (ICU) en la ciudad de Morelia en el centro de México durante la temporada lluviosa 2015. Para esta ciudad, la ICU se detectó con una intensidad promedio de 2 °C y valores máximos de hasta 4° C. La ICU en la ciudad de Morelia se genera principalmente por el cambio de uso del suelo de zonas agrícolas o naturales a zonas residenciales, la falta de áreas verdes en la ciudad y la concentración de actividades que generan calor antropogénico, principalmente el parque vehicular automotor.

Por otro lado, las zonas rurales y las áreas verdes presentaron temperaturas significativamente menores que las zonas urbanas y suburbanas. Encontrándose encontraron diferencias entre estas dos categorías de uso del suelo, por lo que para fines de análisis de isla de calor en el caso de esta ciudad se recomienda tener registros de temperatura tanto en zonas urbanas como suburbanas.

Las zonas rurales tuvieron significativamente menor variación térmica (10.9° C) que las zonas urbanas/suburbanas (13.1 y 12.9° C), mientras que las áreas verdes (11.6° C) se encontraron en un punto medio pero sin diferencia estadística respecto a las zonas rurales.

Se detectó además que el momento de mayor temperatura fue diferente para las zonas rurales y urbanas, ocurriendo este hasta una hora después para las zonas rurales (14:00 horas) y para el caso de las áreas verdes el pico de temperatura ocurre hasta dos horas después (15:00 horas). Esto se explica por la mayor admitancia térmica de los materiales en los ambientes rurales y el mayor enfriamiento por cambio de fase del agua (calor latente). Por último los resultados indican que la precipitación tiene un efecto refrigerante general y tiende a reducir la ICU.

REFERENCIAS

- Alchapar, N.L., Correa, E.N. and Cantón, M.A. (2012), “Índice De Reflectancia Solar De Revestimientos Verticales: Potencial Para La Mitigación De La Isla De Calor Urbana”, *Ambiente Construido*, Vol. 12, pp. 107–123.
- Angel, L., Ramirez, A. and Dominguez, E. (2010), “Isla De Calor Y Cambios Espacio-Temporales De La Temperatura En La Ciudad De Bogotá”, *Revista Academica Colombiana de Ciencias*, Vol. 34, pp. 174–182.
- 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*, Vol. 23, pp. 1–26.

- Ballinas, M. and Barradas, V.L. (2016), “The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model”, *Journal of Environment Quality*, Vol. 45 No. 1, p. 157.
- Bonilla Moheno, M., D. Redo, M. Aide, M. Clark and R. Grau (2013), “Vegetation change and land tenure in Mexico: a country-wide analysis”, *Land Use Policy*, vol. 39, pp. 355-364
- Brower, L.P., Williams, E.H., Fink, L.S., Slayback, D.A., Isabel Ramirez, M., Van Limon Garcia, M., Zubieta, R.R., et al. (2011), “Overwintering Clusters of the Monarch Butterfly Coincide With the Least Hazardous Vertical Temperatures in the Oyamel Forest”, *Journal of the Lepidopterists Society*, Vol. 65 No. 1, pp. 27–46.
- Chambers, J.M., Freeny, A. and Heiberger, R.M. (1992), “Analysis of variance; designed experiments.”, *Statistical Models in S*, Wadsworth & Brooks/Cole.
- Chen, Y., Du, M. and Dong, R. (2008), “Correlation Between Urban Heat Island Effect and the Thermal Inertia Using Aster Data in Beijing , China”, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 37, pp. 1723–1728.
- CONAGUA. (2015), “Canícula en México. Caracterización, resumen 2014 y perspectiva de precipitación y temperatura en agosto y septiembre 2015”, Comisión Nacional del Agua. México, pp. 1–5.
- CONAPO. (2016), “Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010”, *Consejo Nacional de Población, México*, available at: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Zonas_metropolitanas_2010 (accessed 20 December 2015).
- Cui, Y.Y. and de Foy, B. (2012), “Seasonal Variations of the Urban Heat Island at the Surface and the Near-Surface and Reductions due to Urban Vegetation in Mexico City”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 51 No. 5, pp. 855–868.
- EPA. (2012), “Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics”, United States Environmental Protection Agency.
- Garcia, E. (1987), *Modificaciones Al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- García, E. (2004), *Modificaciones Al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Gartland, L. (2008), *Heat Islands : Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas*, Earthscan.
- Golany, S. (1996), “Urban desing morphology and thermal performance”, *Atmospheric Environment*, Vol. 30 No. 3, pp. 455–465.
- Holden, Z. a., Klene, A.E., F. Keefe, R. and G. Moisen, G. (2013), “Design and evaluation of an inexpensive radiation shield for monitoring surface air temperatures”, *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier B.V., Vol. 180, pp. 281–286.
- IMDUM. (2012), “Adecuaciones al Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Morelia 2010”, Instituto Municipal de Desarrollo Urbano de Morelia, México.

- INECC. (2010), “Estudio de emisiones y actividad vehiculares en Morelia, Michoacán”, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México.
- INEGI. (2005), “Población rural y rural ampliada en México 2000”, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI. (2014), “Carta topográfica Morelia”, *Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México*, available at: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825206215> (accessed 15 February 2015).
- Jauregui, E. (1997), “Heat island development in Mexico City”, *Atmospheric Environment*, Vol. 31 No. 22, pp. 3821–3831.
- Jauregui, E., Godinez, L., Cruz, F. and Obregón, V. (1992), “Aspects of heat-island development in Guadalajara, México”, *Atmospheric Environment*, Vol. 26 No. 3, pp. 391–396.
- Kim, Y.-H. and Baik, J.-J. (2002), “Maximum Urban Heat Island Intensity in Seoul”, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 41 No. 6, pp. 651–659.
- Lee, S. and Baik, J. (2010), “Statistical and dynamical characteristics of the urban heat island intensity in Seoul”, *Theor. Appl. Climatol.*, pp. 227–237.
- Maximintegrated. (2015), “DS1921G Thermochron iButton Device”, *Maximintegrated*, pp. 1–42.
- Memon, R.A., Leung, D.Y.C. and Liu, C.H. (2009), “An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating”, *Atmospheric Research*, Elsevier B.V., Vol. 94 No. 3, pp. 491–500.
- Miller, R.G. (1981), *Simultaneous Statistical Inference*, Springer.
- Mills, G. (2004), “The Urban Canopy Layer Heat Island IAUC Teaching Resources”, *International Association for Urban Climate*, pp. 1–5.
- Montavez, J.P., Rodríguez, A. and Jiménez, J. (2000), “A study of the urban heat island of Granada”, *International Journal of Climatology*, Vol. 20, pp. 899–911.
- Moreno, M. del C. (1999), *Climatología Urbana*, Edicions Universitat de Barcelona.
- Oke, T. (1973), “City size and the urban heat island”, *Atmospheric Environment Pergamon Press*, Vol. 7, pp. 769–779.
- Oke, T.R. (1976), “The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands”, *Atmosphere*, Vol. 14 No. 4, pp. 268–277.
- Oke, T.R. (1982), “The energetic basis of the urban heat island”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 108, pp. 1–24.
- Oke, T.R. (1995), “The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects”, *Wind Climate in Cities*, pp. 81–107.
- Oke, T.R. (2002), *Boundary Layer Climates*, Second edi., Taylor & Francis Group.
- Oke, T.R. (2006), “Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites”, *World Meteorological Organization*, available

at:<http://doi.org/Reporte>.

- ONU. (2011), “Las ciudades y el cambio climático: orientaciones para políticas”, *Organización de Las Naciones Unidas*.
- ONU. (2014), “World’s population increasingly urban with more than half living in urban areas”, available at: <http://www.un.org/en/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects-2014.html> (accessed 8 September 2015).
- Patz, J.A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T. and Foley, J.A. (2005), “Impact of regional climate change on human health”, *Nature*, Vol. 438 No. 17, pp. 310–317.
- Rizwan, A.M., Dennis, L.Y.C. and Liu, C. (2008), “A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island”, *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 20, pp. 120–128.
- Ruiz, D. (2015), “Perfil vertical de la temperatura del aire y humedad relativa dentro de un bosque de pino-encino en el sur de la cuenca de Cuitzeo”, *Tesis de Licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*.
- Ryan, J.A. and Ulrich, J.M. (2015), “Package xts”, available at: <http://r-forge.r-project.org/projects/xts/>.
- Santamouris, M. (2015), “Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions”, *The Science of the Total Environment*, Vol. 512-513, pp. 582–598.
- Sarricolea, P., Aliste, E., Castro, P. and 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*, Vol. 8, pp. 71–84.
- SMN. (2016), “Normales Climatológicas: Estación 16080 Morelia”, *Servicio Meteorológico Nacional, México*, available at: <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Normales5110/NORMAL16080.TXT>.
- Stone, B. and Norman, J.M. (2006), “Land use planning and surface heat island formation: A parcel-based radiation flux approach”, *Atmospheric Environment*, Vol. 40 No. 19, pp. 3561–3573.
- Tereshchenko, I.E. and Filonov, a. E. (2001), “Air temperature fluctuations in Guadalajara, Mexico, from 1926 to 1994 in relation to urban growth”, *International Journal of Climatology*, Vol. 21, pp. 483–494.
- UNFPA. (2007), “Estado de la población mundial 2007”, *Fondo de Población de Las Naciones Unidas*.
- Villanueva-Solis, J., Ranfla, A. and Quintanilla-Montoya, A.L. (2013), “Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo”, *Información Tecnológica*, Vol. 24, pp. 15–24.
- Voogt, J. a. and Oke, T.R. (2003), “Thermal remote sensing of urban climates”, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 86, pp. 370–384.
- Voogt, J.A. (2004), “Urban Heat Islands: Hotter Cities”, *Action Bioscience*, available at: <http://www.actionbioscience.org/environment/voogt.html>.

- Weng, Q. (2009), “Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Elsevier B.V., Vol. 64 No. 4, pp. 335–344.
- Yamashita, S. (1996), “Detailed structure of heat island phenomena from moving observations from electric tram-cars in metropolitan Tokyo”, *Atmospheric Environment*, Vol. 30 No. 3, pp. 429–435.
- Yandell, B.S. (1997), *Practical Data Analysis for Designed Experiments*, Chapman & Hall.

11. DISCUSIÓN GENERAL E INTEGRACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se discuten los resultados que se obtuvieron en el presente estudio. Se indican con los números **8.1**, **8.2** y **8.3** los capítulos donde se expresan cada una de las ideas o conceptos.

La revisión bibliográfica permitió encontrar algunas características generales del fenómeno de isla de calor urbana:

Isla de calor superficial

- Presente en todo momento del día y de la noche.
- Mayor presencia durante el día y en el verano, cuando el fuerte calentamiento solar puede llevar a mayores diferencias de temperatura entre las superficies secas y expuestas y aquellas mojadas, sombreadas o con vegetación (EPA 2012; Voogt 2004; Voogt & Oke 2003).

Isla de calor atmosférica

- Puede ser pequeña (en intensidad) durante el día, pero puede alzarse a cientos de metros y extenderse (en dirección del viento) varios kilómetros (Oke 2002).
- Más intensa por la noche y antes del amanecer y en el invierno (Mills 2004; EPA 2012; Oke 1995).

Sin embargo muchos trabajos consultados y revisiones del tema fueron realizados en ciudades europeas y norteamericanas (Rizwan et al. 2008; Stewart 2011) ubicadas al norte del trópico de cáncer (23°26'16"), por lo que ciudades con menor latitud se encuentran subrepresentadas, de forma que muchas de las generalidades encontradas de la literatura no son representativas de estos escenarios (Stewart 2011) (Figura 12). Por esta razón actualmente no existe un acuerdo global respecto a la estacionalidad, forma y máxima intensidad de la ICU, ya que estas características dependerán de las condiciones propias de la localización geográfica del emplazamiento de la ciudad, su entorno y su climatología (Espinoza 2014).

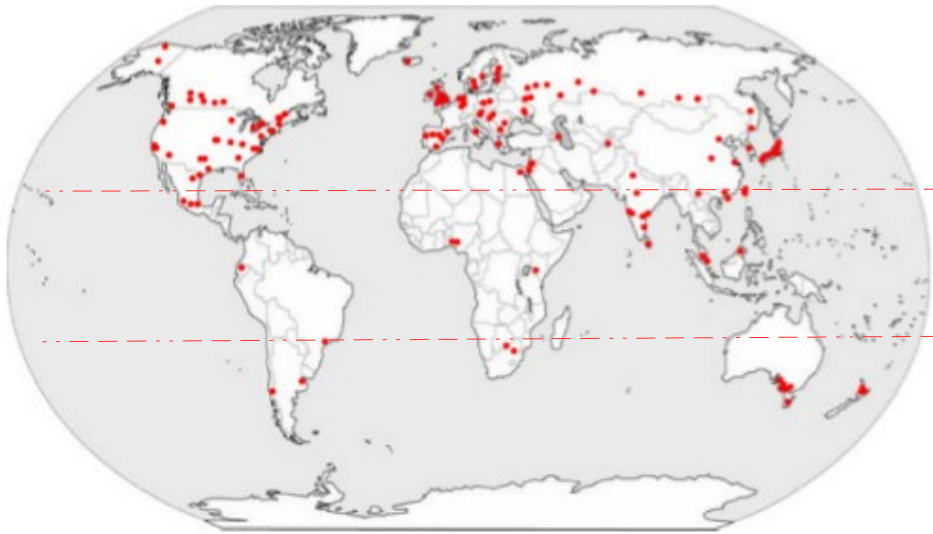


Figura 12. Distribución geográfica de las observaciones de islas de calor de una muestra de 177 artículos realizados en ciudades alrededor del mundo. Tomado de Stewart (2011).

La ciudad de Morelia se encuentra ubicada en una latitud media al sur del trópico de cáncer ($23^{\circ}26'16''$), por lo que la isla de calor detectada en la ciudad difiere de las generalidades del fenómeno reportados en la literatura.

El fenómeno de isla de calor se detectó en el presente estudio en la ciudad de Morelia utilizando dos aproximaciones:

- *Estaciones termométricas.* La intensidad promedio anual de la isla de calor urbana atmosférica fue de 1.9°C . Durante el periodo nocturno (19:00-6:00 hrs) la IICU se mantuvo entre los 1.4 y 1.7°C . La IICU máxima fue de 3°C y se alcanzó durante el día a las 13:00. La IICU mínima se registró también durante el día unas horas después del amanecer a las 9 horas con una intensidad de 1.1°C , alcanzando la mayor intensidad promedio en la época de lluvias (2.2°C), llegando hasta los 3.9°C entre las 12:00 y 13:00 horas durante este periodo (capítulos **8.1** y **8.3**).
- *Teledetección térmica infrarroja satelital.* El análisis de los datos de temperatura superficial, muestra la ocurrencia tanto de una isla de calor urbana, como una isla fría para la ciudad de Morelia. La isla de calor urbana se presenta en los meses de junio a diciembre del 2015 con una intensidad promedio de hasta 7.2°C en septiembre, sin embargo durante los meses mas secos (enero – mayo del 2016) se presentó el fenómeno contrario conocido como isla fría en donde las zonas urbanas presentaron una temperatura inferior a los alrededores rurales de hasta 2.3°C en promedio en el mes de febrero (capítulo **8.2**).

ANÁLISIS DE ALTA RESOLUCIÓN

Mediante el uso de las estaciones termométricas construidas y las estaciones climáticas fue posible conocer con una alta resolución temporal (horaria) la variación de la temperatura ambiente entre los diferentes usos de suelo (8.1 y 8.3). En cuanto a la variación espacial de la temperatura ambiente, esta se limitó a la obtención de datos puntuales de las 10 estaciones termométricas propias y 4 estaciones climáticas distribuidas en los 4 usos de suelo principales de la ciudad. Obteniendo los siguientes resultados (Figura 4 cap. 8.3):

- En la época fría-seca se encontraron diferencias significativas entre la temperatura ambiental de los usos de suelo urbanizados y los no urbanizados ($\alpha \leq 0.05$) pero no así entre las áreas verdes y las zonas rurales .
- En la época lluviosa no se encontraron diferencias entre la temperatura ambiente del uso de suelo rural y las áreas verdes, pero si entre los usos de suelo urbano y suburbano ($\alpha \leq 0.05$).
- Durante la época cálida-seca la prueba de Tukey mostró que todos las coberturas presentan diferencias significativas.

En el presente estudio el fenómeno de isla de calor atmosférica se mantuvo presente durante casi todo el año, con una intensidad promedio anual de 1.9°C, con excepción de las 9:00 horas durante la época cálida-seca, en donde se encontró una intensidad negativa de -0.3 °C en promedio. Las intensidades mas elevadas se registraron durante el día en la época lluviosa (3.9°C) (Figura 6 cap. 8.3).

En la época lluviosa, la precipitación tuvo un efecto positivo en la reducción de la intensidad de isla de calor, al reducir el efecto en 0.3 °C los días en que ocurrieron eventos de precipitación superiores a 10 mm (Figura 7 cap. 8.1).

Por otro la generación de mapas térmicos de temperatura, permitió conocer la variación espacial de la temperatura superficial con una alta resolución espacial (30 m). Esta es lo suficientemente detalla para determinar la variación espacial entre los usos de suelo de la ciudad e inclusive entre estructuras dentro del uso de suelo urbano. Sin embargo una de las limitantes de esta aproximación es la resolución temporal, debido a que el paso del satélite es cada 16 días. De forma que solo es posible obtener una o dos imágenes al mes. De esta aproximación se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 3 y Figura 4 cap. 8.3):

- Los análisis de varianza y pruebas de Tukey realizadas en cada una de las fechas, mostraron que existen diferencias estadísticas significativas entre todos los usos de suelo, prácticamente durante todo el año, con excepción del mes de diciembre en donde los usos de suelo urbano y suburbano no mostraron diferencias estadísticas y marzo donde las temperaturas de los usos de los terrenos baldíos y el uso de suelo urbano no mostraron diferencias significativas.
- Los usos de suelo de la zona de estudio presentan el mismo patrón de temperatura superficial promedio (urbano > suburbano > terrenos > rural > áreas verdes) durante la época lluviosa (junio a octubre). Presentándose la temperatura superficial

mas alta en todos los usos de suelo en el mes de junio y la mas baja en el mes de julio. La temperatura superficial promedio mas baja se presentó en las áreas verdes durante todo el año.

- La dinámica de temperatura superficial cambia durante la época fría-seca (noviembre-febrero), en donde la temperatura de las zonas rurales incrementa 0.6 °C superando a la temperatura superficial de los terrenos baldíos (urbano>suburbano>rural>terrenos>áreas verdes). En el mes enero el uso de suelo con mayor temperatura superficial fue el rural y el suburbano con una temperatura promedio de 27.5 °C en ambos casos, seguido por los terrenos baldíos, el uso de suelo urbano y áreas verdes (rural \geq suburbano > terrenos > urbano > áreas verdes).
- A partir del final de la época fría-seca (noviembre-febrero) y durante toda la época cálida-seca (Marzo-Mayo) el uso de suelo con mayor temperatura fue el rural, seguido por el uso de suelo suburbano, con excepción del mes de marzo donde los terrenos baldíos y el uso de suelo urbano tuvieron temperaturas mas altas que el uso de suelo suburbano.

A partir de los resultados obtenidos en los apartados **8.2** y **8.3**; se encontró que las mayores intensidades de isla de calor superficial y atmosférica a la hora de paso del satélite Landsat (11:00 am, hora local) se produce durante la temporada cálida-lluviosa (junio-octubre) (Cuadro 2, cap. 8.3). De igual manera se encontraron correlaciones significativas entre la temperatura superficial y el NDVI durante toda la época de lluvias (junio-octubre) (Figura 5, cap. 8.2) y entre la temperatura superficial y la temperatura ambiente durante los meses de julio-octubre (Figura 5, cap. 8.3). El análisis anual de intensidad de isla de calor atmosférica (Figura 6, cap 8.3) muestra que la temporada con mayores intensidades fue la cálida-lluviosa durante el día.

Las relaciones entre la época lluviosa, la temperatura ambiente y la intensidad de isla de calor se explican de la siguiente manera; durante los meses de la época cálida-lluviosa las precipitaciones son mayores (Figura 13) por lo que el contenido de humedad en el suelo aumenta, generando una mayor resistencia al calentamiento en zonas sin urbanizar debido a que aumenta el calor específico en el suelo. Por otro lado aumenta la disponibilidad de agua para las plantas y por tanto una mayor cobertura vegetal en las zonas no urbanizadas (rurales, áreas verdes). De esta manera las zonas con mayor vegetación y sobre todo con vegetación arbórea tienden a tener menores temperaturas debido a la transpiración de las plantas (Ballinas y Barradas 2016). Durante época cálida-lluviosa el NDVI de las zonas no urbanizadas es mayor debido al aumento de la vegetación, por lo que la regresión entre los promedios de NDVI y temperatura superficial de los diferentes usos de suelo, la relación es inversa y significativa ($P < 0.05$). Debido a que la inercia térmica de la vegetación en zonas no urbanizadas es menor que la inercia térmica de los materiales de construcción de las zonas urbanas, los sitios con cobertura vegetal presentan temperaturas superficiales menores.

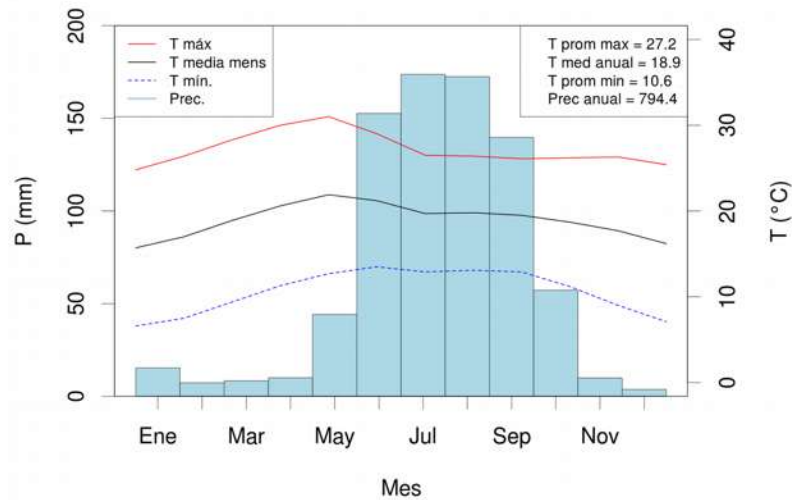


Figura 13. Climograma para la ciudad de Morelia. Precipitación mensual y temperaturas máxima, media y mínima mensuales. El recuadro muestra promedios anuales para temperatura máxima, media y mínima y precipitación total anual. Datos del observatorio meteorológico 16080 del SMN (SMN 2016).

COMPARACIÓN CON OTRAS CIUDADES MEXICANAS

El presente estudio no tiene precedentes en el país por debido a que el numero de estaciones usadas supera a otros estudios en México y es el primero en usar teledetección térmica infrarroja de alta resolución. En el cuadro 7 se compara la intensidad máxima de isla de calor atmosférica con otros estudios en el país.

Cuadro 7. Comparación de de la Intensidad de isla de calor urbana de Morelia con otros estudios realizados en México (Guzman 2015)

Zona metropolitana	IICU máxima (°C)	Tipo de clima	Estudio	Periodo analizado
Acapulco	3.8	Cálido subhúmedo con lluvias en verano	Jáuregui (2004)	Modelo
Cd. Juárez	4.2	Desértico	Jáuregui (2004)	Modelo
Guadalajara	7.0	Templado subhúmedo con lluvias en verano	Jáuregui et al. (1992)	1931 – 1970
León	4.2	Templado subhúmedo con lluvias en verano	Jáuregui (2004)	Modelo
Ciudad de México	7.8	Templado subhúmedo, seco, semiseco y templado húmedo con lluvias en verano	Jáuregui, (1997)	Mayo 1994 a Abril 1995
Mexicali	4.5	Desértico cálido	Jáuregui, (2007)	1998
Monterrey	5.1	Semiárido cálido en verano y templado subhúmedo en invierno lluvias en verano	Jáuregui (2004)	Modelo
Puebla	4.7	Templado subhúmedo con lluvias en verano	Jáuregui (2004)	Modelo
Tijuana	4.3	Mediterráneo seco	Jáuregui (2004)	Modelo
Toluca	4.0	Templado subhúmedo de altura	Jáuregui, (1979)	Febrero 1977 a Octubre 1990
Veracruz	3.7	Semicálido húmedo	Jáuregui (2004)	Modelo
Morelia	3.9	Templado con lluvias en verano	Mora y Gómez-Tagle (2017)	2015-2016

CAUSAS DE LA ISLA DE CALOR

Las principales causas de la isla del calor atmosférica en la ciudad de Morelia son:

- *Falta de vegetación perenne y áreas verdes.* Las áreas con vegetación, especialmente aquellas de porte arbóreo actúan como un agente refrigerante y regulador de la temperatura ambiente a través de la transpiración. En el caso de la ciudad de Morelia las áreas verdes son pocas en número y tamaño ya que ocupan menos del 1.5% de la zona urbana (IMDUM 2012).
- *Las propiedades térmicas de los materiales de construcción de las zonas urbanas.* El concreto y asfalto son los principales materiales de construcción empleados ampliamente en el interior de las ciudades, los cuales tienen baja reflectancia y una alta absorbancia (Gartland 2008) e inercia térmica (Chen et al. 2008). Estos materiales contrastan con aquellos presentes en las áreas rurales donde los principales materiales que se encuentran sobre el terreno son el suelo y la vegetación. Las propiedades térmicas de los materiales regulan el intercambio de energía que se da en el contacto entre la superficie y la capa inferior de la atmósfera (Weng 2009) donde normalmente las áreas sin construcciones y con vegetación tienen temperaturas superficiales más frías, las cuales contribuyen a temperaturas de aire más frío respecto a las áreas urbanas (Voogt & Oke 2003). En la ciudad de Morelia la mayor parte de las construcciones tienen un uso habitacional-comercial (72.5%) hechas en su mayoría a base de concreto, mampostería y con densidades de edificación entre 13 viv/ha y 130 viv/ha (IMDUM 2012).
- *La concentración de actividades que emiten calor antropogénico.* En la ciudad de Morelia la fuente principal de calor antropogénico son los vehículos automotores ya que existen pocas zonas industriales las cuales ocupan menos del 0.9 % del área urbanizada. Sin embargo el parque vehicular se estimó en 251,376 vehículos activos para 2015 de acuerdo con los datos proporcionados por el Estudio de Emisiones y Actividad Vehicular en Morelia, Michoacán (INECC 2010).

APLICACIONES DEL ESTUDIO

El presente estudio permitió conocer la variación espacio-temporal a resoluciones altas, al hacer el análisis combinado de la información proporcionada por las estaciones climáticas (alta resolución temporal) y las imágenes satelitales térmicas (alta resolución espacial disponible gratuita).

Uno de los puntos fuertes del procesamiento de imágenes satelitales térmicas, es que es posible generar **cartografía térmica superficial** de diferentes zonas de la ciudad y sus alrededores rurales. Mediante esta cartografía térmica es posible detectar cuales son las zonas con mayor temperatura superficial dentro de la ciudad y por tanto los sitios de mayor vulnerabilidad y riesgo, dentro de los cuales destacan las zonas con estacionamientos grandes como pueden ser el estadio de fútbol (estadio Morelos), centros comerciales y algunas zonas densamente edificadas incluyendo el centro de la ciudad (Figura 14).

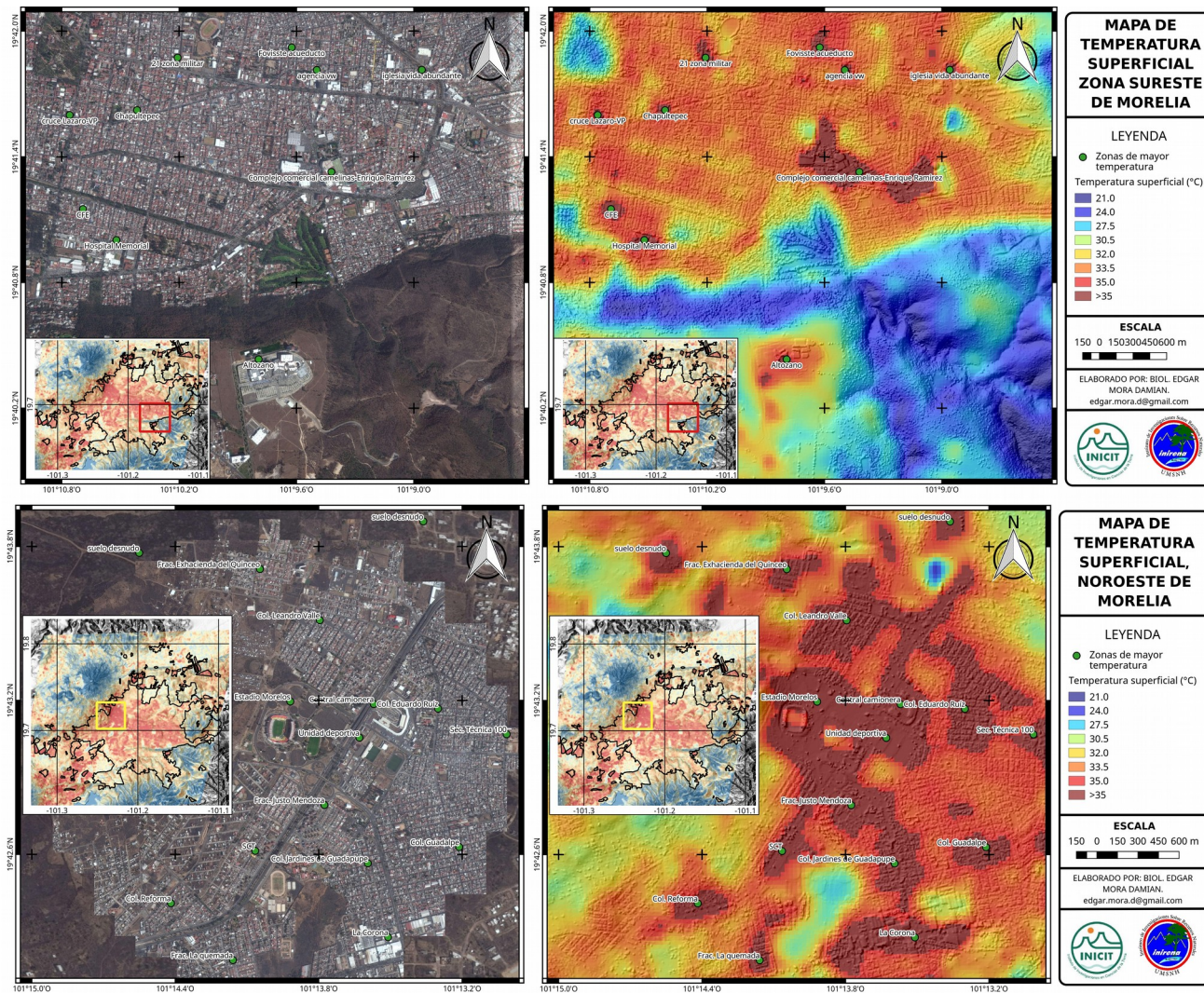


Figura 14. Cartografía térmica superficial.

Otro punto importante del estudio fue el análisis de temperatura de alta resolución temporal. Mediante este análisis es posible detectar las horas de mayor temperatura y las horas en que la temperatura de las zonas urbanas se eleva mas respecto a las zonas rurales, para así poder prevenir a la población de posibles riesgos asociados a temperaturas altas potenciados por el efecto de isla de calor urbana (Figura 15).

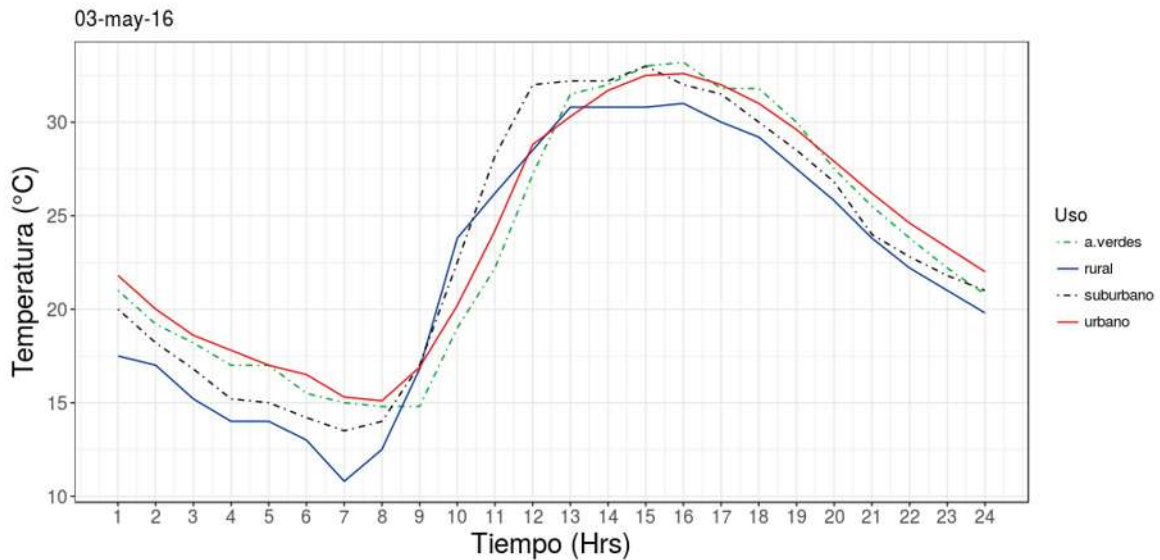


Figura 15. Análisis horario de la intensidad de isla de calor para el día 3 de mayo del 2016. En este día ocurre el fenómeno de isla fría a las 10, 11 y 13 horas, cuando la temperatura ambiental de las zonas rurales supera la temperatura ambiental de las áreas urbanas.

PERSPECTIVAS PARA LA PLANEACIÓN URBANA Y MITIGACIÓN

La información generada en este trabajo corrobora la formación de una isla de calor atmosférica y superficial en la ciudad de Morelia, Michoacán. El aumento en la temperatura hacia el interior de las zonas urbanas, tiene un efecto negativo en el confort térmico que perciben los habitantes de la ciudad, aumentando el estrés por calor, la aparición de muchas enfermedades infecciosas y un aumento en el consumo energético. Por lo que el efecto de ICU tiene que ser tomado en cuenta en la planificación del crecimiento de la ciudad, ya que el uso del suelo es uno de los controles principales de la ocurrencia de la ocurrencia tanto de las ICUa y la ICUs, debido a las propiedades térmicas de los materiales de construcción, sin embargo se considera además que la presencia de la ICU está asociada también a la concentración de actividades que generan calor antropogénico en usos de suelo urbano/suburbano, como el transporte automotor.

Es por esto que a partir de la información generada en este proyecto se proponen las siguientes estrategias de planeación urbana para la mitigación de isla de calor en la ciudad de Morelia:

- a) Incremento de áreas verdes con vegetación arbórea en el interior de la ciudad.
- b) Reducción de calor antropogénico, principalmente el generado por vehículos automotores incrementando la eficiencia del transporte público y el uso de medios de transporte alternativos con baja generación de calor antropogénico (p.ej. bicicletas o vehículos eléctricos).
- c) Implementación de ecotecnias encaminadas a reducir la temperatura en ambientes urbanos (p.ej. azoteas y muros verdes).
- d) Inclusión de análisis de efecto térmico e isla de calor en los planes de desarrollo urbano,
- e) Inclusión de análisis de efecto térmico e isla de calor en los estudios y manifestaciones de impacto ambiental para los nuevos desarrollos urbanos y complejos habitacionales.

SUGERENCIAS

En el presente trabajo se realizó un análisis espacio-temporal de la isla de calor urbana en la ciudad de Morelia considerando la resolución espacial y temporal. Por lo que las sugerencias en este sentido es aumentar mas aún la resolución tanto espacial como temporal de los datos de temperatura ambiente, así como los de temperatura superficial de acuerdo con los siguientes lineamientos:

- Usar imágenes satelitales térmicas de mayor resolución espacial. En la fecha del comienzo de elaboración de este trabajo las imágenes satelitales térmicas gratuitas de mayor resolución eran las Landsat 8 con una resolución de 100m pero remuestreadas a 30m. No se descarta que en un futuro cercano estén disponibles de manera gratuita nuevas imágenes de otras misiones.
- Usar imágenes satelitales térmicas de mayor resolución temporal, como las proporcionadas por la misión espacial MODIS, de las cuales se pueden obtener hasta 4 imágenes por día, sin embargo estas tienen poca resolución espacial (1km² por pixel).
- Usar sensores con mayor capacidad de almacenamiento y programarlos para tomar datos a resoluciones temporales menores a una hora.
- Incrementar la cantidad de estaciones termométricas (20 o 30) y distribuir las dentro de los diferentes usos de suelo de la ciudad y sus alrededores rurales considerando un muestreo espacio-temporal.

En el presente estudio se planteó descargar en tiempo real los datos meteorológicos de la red de 10 estaciones del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia (OOAPAS) de manera automática, empleando el manejador de procesos automatizados cronitab para Linux (Debian/Ubuntu) y un programa de descarga y lectura de los archivos en R. Sin embargo la página donde se publican y se actualizan los datos cada 10 minutos (<http://prevencion.ooapas.gob.mx/sistmon.php>) dejó de funcionar a principios de junio del 2015 y volvió a funcionar hasta noviembre del mismo año.

Otro de los problemas de la red de estaciones del OOAPAS es que a pesar de que tienen una red de 10 estaciones, solo 3 mostraron datos con suficiente calidad (continuidad); estación Acueducto, Santa María y Felipe Carrillo Puerto, ya que las otras 7 mostraban inconsistencias, valores disparados y huecos en las series de tiempo por lo que estas fueron descartadas.

Debido a estos problemas se emite una recomendación al OOAPAS para que mejore su red de estaciones climáticas, revisando las estaciones con inconsistencias y evitando que la página deje de subir información en línea, además de que los datos tomados cada 10 minutos sean almacenados en una base de datos y esta este disponible en línea.

BIBLIOGRAFÍA

- Ballinas, M. & Barradas, V.L., 2016. The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. *Journal of Environment Quality*, 45(1), p.157.
- Chen, Y., Du, M. & Dong, R., 2008. Correlation Between Urban Heat Island Effect and the Thermal Inertia Using Aster Data in Beijing , China. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, pp.1723–1728.
- EPA, 2012. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics. En United States Environmental Protection Agency.
- Espinoza, S., 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 1.
- Gartland, L., 2008. *Heat islands : understanding and mitigating heat in urban areas*, Earthscan.
- Guzman, P., 2015. *Análisis climático y uso de suelo para la evaluación de isla de calor en la ciudad de morelia michoacán.*
- IMDUM, 2012. Adecuaciones al Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Morelia 2010. En Instituto Municipal de Desarrollo Urbano de Morelia, México.
- INECC, 2010. Estudio de emisiones y actividad vehiculares en Morelia, Michoacán. En Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México.
- Mills, G., 2004. The Urban Canopy Layer Heat Island IAUC Teaching Resources. En *International Association for Urban Climate*. pp. 1–5. Available at: <http://www.urban-climate.org/?s=The+Urban+Canopy+Layer+Heat+Island>.
- Oke, T.R., 2002. *Boundary Layer Climates* Second edi., Taylor & Francis Group.
- Oke, T.R., 1995. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. *Wind climate in cities*, pp.81–107.

- Rizwan, A.M., Dennis, L.Y.C. & Liu, C., 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20, pp.120–128.
- SMN, 2016. Normales Climatológicas: Estación 16080 Morelia. *Servicio Meteorológico Nacional, México*. Available at: <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Normales5110/NORMAL16080.TXT>.
- Stewart, I.D., 2011. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31, pp.200–217.
- Voogt, J.A., 2004. Urban Heat Islands: Hotter Cities. *Action bioscience*. Available at: <http://www.actionbioscience.org/environment/voogt.html>.
- Voogt, J. a. & Oke, T.R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, pp.370–384.
- Weng, Q., 2009. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), pp.335–344. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007>.