



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA  
GEOGRAFÍA AMBIENTAL

**VARIABILIDAD DE LA ISLA DE CALOR EN LA CIUDAD DE  
AGUASCALIENTES, MÉXICO**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRA EN GEOGRAFÍA**

PRESENTA:  
**TANIA ISABEL RODRÍGUEZ MOSQUEDA**

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ERNESTO DOS SANTOS CAETANO NETO  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

Ciudad Universitaria, CD. MX. Enero, 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## *Dedicatorias*

*A mis mascotas Grecia, Gea, Cronos, Andrómeda y Cometa porque más que mascotas son mis fieles compañeros que siempre me han demostrado su amor incondicional. Los amo tanto, mi vida sin ellos no sería la misma, me hacen muy feliz. También a mis otros bebés Daysy, Ciruelo y Jerry que ya no están conmigo, pero fueron parte importante en mi vida y siempre los voy a amar.*

*A las personas más importantes en mi vida, mis papás, porque no hay palabras para expresar todo el amor, cariño y agradecimiento que siento por ustedes. Gracias por quererme siempre.*

*A mi tía Rocio (q.e.p.d.) porque siempre me cuidaste y estuviste pendiente de mí. Sé que este logro te habría hecho sentir orgullosa de mí. En donde estés, te doy las gracias por todo.*

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico para concluir los estudios de posgrado y esta investigación.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad de formarme en sus aulas desde el bachillerato hasta el posgrado. El camino no ha sido fácil, pero en sus instalaciones he encontrado excelentes profesores que me han guiado a lo largo de mi vida estudiantil, los recuerdo con cariño, gracias a todos.

A mi asesor el Dr. Ernesto dos Santos Caetano Neto por aceptarme como su tesista, por sus valiosas enseñanzas tanto en clase, como en las asesorías al realizar esta investigación. Gracias por confiar en mí y en mis capacidades, por expandir mis horizontes dentro de la Climatología urbana, así como por impulsarme a seguir más allá de lo que yo podía imaginar.

A los miembros del sínodo, la Dra. Elda Luyando López y la Dra. Leticia Gómez Mendoza por sus observaciones acertadas a la tesis, por enseñarme las bases de la Climatología es sus clases, por motivarme a seguir, son excelentes profesoras, son un ejemplo a seguir. A la Mtra. Karla Pereyra Castro por ayudarme en todo momento sin pedir nada a cambio, por ser muy paciente conmigo, por compartir su conocimiento, por las observaciones hechas al trabajo. Al Dr. Juan Matías Méndez Pérez por sus valiosas aportaciones. A todos, gracias por su tiempo.

A mis papás, son los mejores, agradezco que siempre me han dado su amor incondicional. Me han apoyado tanto que no habría podido llegar hasta aquí sin ustedes.

A mis amigos del posgrado Dennise y Víctor porque las clases no hubieran sido lo mismo sin ustedes. Les deseo lo mejor, sé que llegarán lejos.

A Enrique, bebé gracias por acompañarme en todo este proceso, por echarme la mano siempre, incondicionalmente. Por llevarme de práctica de campo cada vez que podías jaja. Te quiero mucho.

A Jenny Corrales porque, aunque nunca nos conocimos físicamente, me ayudaste mucho con el análisis de las imágenes satelitales, gracias por la paciencia, de todo corazón deseo que te vaya muy bien.

## ÍNDICE GENERAL

<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Justificación.....	1
1.2 Objetivo general .....	2
1.3 Objetivos particulares .....	3
1.4 Hipótesis .....	3
1.5 Estructura de la tesis.....	3
1.6 Caracterización geográfica de la ciudad de Aguascalientes .....	4
1.6.1 Historia y crecimiento de la ciudad de Aguascalientes.....	5
1.6.2 Crecimiento poblacional y expansión urbana .....	8
1.6.3 Climatología.....	11
1.6.4 Geomorfología .....	17
1.6.5 Hidrología .....	18
<b>Capítulo 2. Marco teórico-conceptual</b> .....	<b>20</b>
2.1 Climatología urbana .....	20
2.1.1 Clima urbano e Isla de Calor Urbana .....	22
2.2 Percepción remota y clima urbano .....	27
2.2.1 Estimación de la Emisividad de Superficie .....	29
2.2.2 Estimación de la Temperatura de Superficie .....	30
2.3 Modelación y clima urbano.....	32
2.3.1 Modelo CALMET.....	34
2.4 Antecedentes investigativos .....	36
<b>Capítulo 3. Metodología</b> .....	<b>39</b>
3.1 Datos.....	39
3.1.1 Imágenes Landsat 8 .....	39
3.1.2 Estaciones meteorológicas .....	41
3.1.3 Modelo CALMET.....	43
3.1.3.1 Configuración de los experimentos.....	44
3.2 Método .....	46
3.2.1 Derivación de las temperaturas de superficie de brillo .....	46
3.2.2 Derivación de la Emisividad de Superficie.....	48
3.2.3 Derivación de la Temperatura de Superficie .....	49
3.2.4 Cálculo de la intensidad de la Isla de Calor Urbana Superficial.....	50
3.2.5 Cálculo de la Isla de Calor Urbana atmosférica .....	50

3.2.6 Obtención de la Isla de Calor Urbana tridimensional.....	51
<b>Capítulo 4. Resultados y conclusiones.....</b>	<b>57</b>
4.1 Isla de Calor Urbana Superficial .....	57
4.2 Isla de Calor Urbana atmosférica .....	74
4.3 Isla de Calor Urbana simulada .....	78
4.4 Discusión y conclusiones .....	89
<b>Referencias .....</b>	<b>94</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ciudad de Aguascalientes, Aguascalientes .....	5
Figuras 1.2 Extensión actual de la ciudad de Aguascalientes: (a) ciudad completa, (b) zona centro, (c) zona sureste, (d) zona noroeste.....	8
Figura 1.3 Crecimiento poblacional, ciudad de Aguascalientes, 1575-2010.....	9
Figura 1.4 Expansión urbana, ciudad de Aguascalientes, 1575-2010.....	10
Figura 1.5 Población total del municipio de Aguascalientes y de la zona metropolitana, 2010-2030.....	11
Figura 1.6 Tipos de clima, ciudad de Aguascalientes.....	12
Figura 1.7 Temperatura, Estación Aguascalientes 1030, ciudad de Aguascalientes.....	13
Figura 1.8 Precipitación, Estación Aguascalientes 1030, ciudad de Aguascalientes.....	13
Figura 1.9 Temperaturas por normales climatológicas Estación Aguascalientes 1030, ciudad de Aguascalientes.....	14
Figuras 1.10 Humedad relativa (a) enero y (b) julio en la estación Universidad (urbano) y San Jacobo (rural), 2013 y 2015.....	15
Figura 1.11 Radiación solar, ciudad de Aguascalientes.....	16
Figuras 1.12 Circulación general de vientos a 10 m de altura, (a) invierno y (b) verano, centro occidente de México .....	17
Figura 1.13 Fisiografía y sistema de topoformas, ciudad de Aguascalientes.....	18
Figura 1.14 Ríos y subcuencas, ciudad de Aguascalientes.....	19



Figura 2.1 Segmentaciones de la atmósfera urbana y sus escalas de estudio .....	23
Figuras 3.1 Estación Universidad, Aguascalientes.....	42
Figuras 3.2 Estación San Jacobo, Aguascalientes.....	42
Figura 3.3 Dominio de estudio y usos de suelo en el modelo CALMET.....	44
Figuras 4.1 NDVI (a) enero 2014 y (b) julio 2015.....	58
Figuras 4. 2a-d Isla de Calor Urbana Superficial mayo, 2013 y 2015 .....	60
Figuras 4.3 Isla de Calor Urbana Superficial (a) junio y (b) julio, 2013 y 2015.....	63
Figuras 4.4a-d Isla de Calor Urbana Superficial noviembre, 2013 y 2015.....	65
Figuras 4.5a-e Isla de Calor Urbana Superficial enero, 2014 y 2015.....	68
Figuras 4.6a-h Marcha diurna de la temperatura para días seleccionados, estación Universidad y San Jacobo, 2013 y 2015.....	73
Figuras 4.7 (a) Marcha diurna y (b) nocturna de la temperatura del aire, Universidad y San Jacobo, 2013 y 2015.....	75
Figuras 4.8a-d Marcha de la temperatura del aire a lo largo del día por meses, Universidad y San Jacobo, 2013 y 2015.....	76
Figuras 4.9a-i Temperatura simulada a 10 m de altura, periodo diurno y nocturno de primavera.....	79

Figuras 4.10a-e Temperatura simulada a 10 m de altura, periodo diurno y nocturno de verano, 2013.....	81
Figuras 4.11a-f Temperatura simulada a 10 m de altura, periodo diurno y nocturno de otoño, 2013.....	82
Figuras 4.12a-g Temperatura simulada a 10 m de altura, periodo diurno y nocturno de invierno, 2013.....	83
Figuras 4.13a-h Perfil de temperatura simulada en diferentes ubicaciones de la ciudad, primavera, 2013.....	84
Figuras 4.14a-l Perfil de temperatura simulada en diferentes ubicaciones de la ciudad, verano, 2013.....	85
Figuras 4.15a-l. Perfil de temperatura simulada en diferentes ubicaciones de la ciudad, otoño, 2013.....	86
Figuras 4.16a-l. Perfil de temperatura simulada en diferentes ubicaciones de la ciudad de invierno, 2013.....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Antecedentes investigativos en México.....	37
Tabla 3.1 Fechas y horarios de adquisición de imágenes Landsat 8 seleccionadas.....	40
Tabla 3.2 Constantes propuestas por Holtslag y van Ulden (1983).....	52

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Justificación

En la actualidad las ciudades son uno de los objetos ampliamente estudiados por un sinnúmero de campos de conocimiento, debido al rápido crecimiento que han experimentado en las últimas décadas, así como por el cambio radical a la forma en la que viven los seres humanos. De acuerdo con un informe publicado por Naciones Unidas en 2018, alrededor del 55% de la población mundial vivía en ambientes urbanos. Las proyecciones mostraron que para 2050 será el 68%, es decir un aumento del 13% de la población mundial, especialmente en países en vías de desarrollo (Naciones Unidas, 2018). México no es la excepción a este patrón, ya que sus ciudades han tenido un aumento gradual de la población urbana desde la década de los 60's del siglo XX, así como una creciente expansión espacial tanto en la horizontal como en la vertical; por lo que para el año 2015 la encuesta intercensal registró un porcentaje de población urbano del 77% (INEGI, 2016b).

Sin lugar a duda estos espacios son una de las modificaciones antrópicas que presentan muchos beneficios a la población que habita en ellos. También es indiscutible que existen múltiples consecuencias asociadas a estos espacios intensamente transformados por el ser humano. Una de éstas son las alteraciones antropogénicas sobre clima regional, que se manifiestan principalmente con el considerable aumento de las temperaturas del aire y de la superficie urbana en comparación con los ambientes rurales circundantes. Este fenómeno es denominado como Isla de Calor Urbana (ICU) y se ha referido su presencia desde el siglo XVII con la obra de Luke Howard llamada *The climate of London* (Howard, 1833).

Mucho se ha avanzado en este campo de conocimiento desde entonces. Los aportes más destacados se encuentran en la diversificación de metodologías para el estudio de la ICU. Así, los primeros estudios comparaban los datos de estaciones meteorológicas urbanas y rurales para observar estas diferencias en la temperatura del aire y calcular la intensidad de la ICU. Posteriormente, con el lanzamiento de

sensores remotos al espacio y la consecuente disposición de imágenes satelitales, pudo ser posible el uso de las bandas térmicas para obtener datos de la Temperatura Superficial Terrestre y observar su distribución dentro y fuera de la ciudad. Finalmente, los métodos de más reciente creación son los modelos meteorológicos que vienen a complementar el vacío que existe respecto a los primeros debido a que son multiescalares permitiendo estudiar desde un cañón urbano, hasta la ciudad completa, además de brindar datos en altura de la atmósfera urbana.

En la actualidad es muy común encontrar trabajos con el uso de los primeros dos, sin embargo los modelos han ido cobrando relevancia en años recientes. Asimismo, con frecuencia se encuentran trabajos en los que estas técnicas se complementan entre sí con el objetivo de entender de manera más completa el complejo fenómeno de la isla de calor.

Mucho se ha estudiado sobre la presencia de ICU en diversas ciudades importantes de México (Barradas, 1991; Jáuregui, et al., 1992; Romero Dávila, et al., 2011; Cui y De Foy, 2012; Luyando, 2016), sin embargo, en ciudades con una dinámica económica importante, pero de menor jerarquía, así como en climas semiáridos como Aguascalientes, no se les ha prestado suficiente atención. Las características territoriales y económicas de la ciudad de Aguascalientes la han consolidado como una de las ciudades más importantes dentro de la región centro occidental del país y, aunque cuenta con una extensión pequeña en comparación con otras ciudades, el plan de ordenamiento territorial (IMPLAN, 2015) proyecta que haya un crecimiento densificado en la ciudad en los próximos años. La intención es que no se rebasen los límites ya establecidos, aunque se continúe edificando hacia el interior, lo cual continuará generando un polo de atracción económica y poblacional del resto de sus municipios contiguos.

## **1.2 Objetivo general**

- Identificar la variabilidad espacial y temporal de la Isla de Calor Urbana en la ciudad de Aguascalientes, México

### **1.3 Objetivos particulares**

- Estimar la intensidad de la Isla de Calor Urbana Superficial estacional a través del uso de imágenes satelitales Landsat 8 en la ciudad de Aguascalientes, México
- Caracterizar la magnitud de la Isla de Calor Urbana atmosférica estacional con datos meteorológicos de superficie en la ciudad de Aguascalientes, México
- Simular la Isla de Calor Urbana tridimensional mediante el modelo CALMET en la ciudad de Aguascalientes, México

### **1.4 Hipótesis**

La cobertura de uso de suelo heterogénea, la variabilidad interanual de la temperatura, la localización y el tamaño de la ciudad de Aguascalientes son elementos que contribuyen a la presencia de islas de calor diferenciadas a lo largo del año.

### **1.5 Estructura de la tesis**

El presente trabajo está organizado en 4 capítulos. El primer capítulo trata los temas relacionados al origen, crecimiento y expansión de la ciudad de Aguascalientes, así como su estructura urbana actual. Posteriormente se ahonda en los elementos que componen el clima de la región en donde se ubica la ciudad.

El segundo capítulo aborda el marco teórico-conceptual que guiará al lector sobre los conceptos alrededor de la Climatología urbana. Se inicia con los orígenes y la evolución de la Climatología urbana, para dar paso a los métodos y técnicas que se utilizan en la actualidad. A continuación se expone una de las principales consecuencias de la urbanización, la isla de calor, sus causas y los distintos tipos de isla que se identifican de acuerdo a la forma en la que se mide el fenómeno. Después se explica cada uno de los conceptos que están relacionados con la

metodología empleada. Finalmente, se encuentra un breve apartado de los antecedentes investigativos en México.

El tercer capítulo se divide en dos partes. En la primera se describen los datos utilizados, sus características, fuentes y la justificación de su uso. Y en la segunda parte se encuentran los métodos seleccionados para la obtención de resultados.

En el último capítulo se centra en los resultados y las conclusiones de la investigación. Los resultados se ordenaron de acuerdo a la metodología planteada, por lo que primero se encuentran los mapas de la intensidad de la Isla de Calor Urbana Superficial, después las gráficas que muestran la variabilidad de temperatura del aire y al final están los mapas y perfiles de temperatura producto de la simulación con el modelo CALMET. Para cerrar el capítulo se presenta la discusión y conclusiones de los resultados alcanzados.

Esta investigación aportó evidencias que demuestran la presencia de la isla de calor sobre una ciudad de tamaño medio como lo es la ciudad de Aguascalientes. Además, la ejecución de diferentes métodos propios de la Climatología urbana contribuyó a identificar patrones del fenómeno en diferentes alturas de la atmósfera urbana.

El cuerpo teórico de la tesis proporciona amplio conocimiento para todos los trabajos futuros que se realicen desde la Climatología urbana, especialmente aquellos que aborden temas como las islas frías en ambientes áridos y semiáridos.

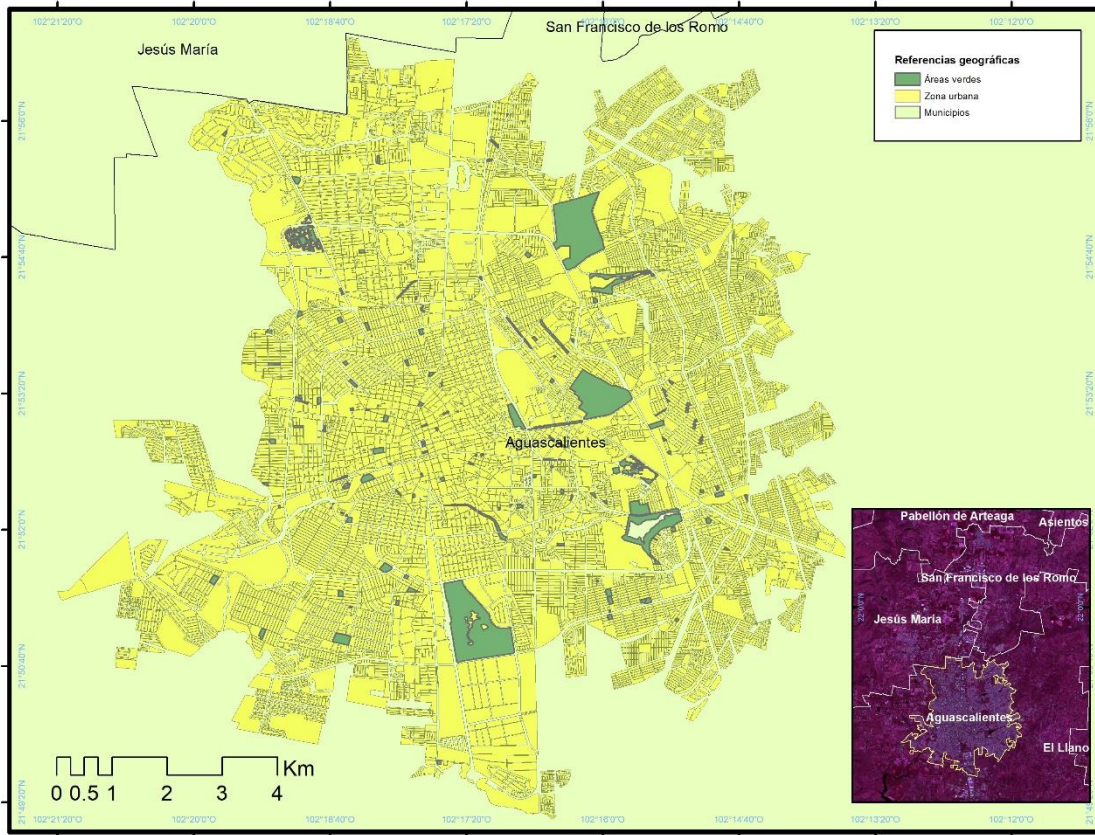
Se espera que la demostración de la existencia de la isla de calor incentive al gobierno del municipio de Aguascalientes a generar medidas de mitigación ante este aumento antropogénico de las temperaturas dentro de la ciudad, que en un futuro pudieran tener consecuencias en el bienestar y la salud de sus habitantes.

## **1.6 Caracterización geográfica de la ciudad de Aguascalientes**

La ciudad de Aguascalientes se localiza dentro del municipio y el estado del mismo nombre ubicado en el centro occidente de México (Figura 1.1). Colinda con los municipios de Jesús María al oeste y San Francisco de los Romo al norte; la ciudad

de Aguascalientes en conjunto con las dos cabeceras municipales antes mencionadas conforman la Zona Metropolitana de la ciudad de Aguascalientes decretada en 1996 (SEGOUT, 2014).

**Figura 1.1 Ciudad de Aguascalientes, Aguascalientes**



Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2014).

### 1.6.1 Historia y crecimiento de la ciudad de Aguascalientes

La ciudad de Aguascalientes es el área más antigua de todo el estado. Fue fundada en el año de 1575 bajo el nombre de la antigua Villa de Nuestra Señora de la Asunción de las Aguas Calientes. Posteriormente el estado se conformó oficialmente hasta 1835 (Aguilar-Mata, 2005). Una vez establecida, la ciudad fue creciendo a partir de los seis barrios originarios: Barrio de Guadalupe, Barrio de la Estación, Barrio de la Purísima, Barrio de la Salud, Barrio de San Marcos y Barrio



de El Encino. Cada barrio cumplió con un función social y productiva por varios siglos, ya que conformaban una relación funcional relativamente cohesionada que ayudó al desarrollo de la ciudad (2015, IMPLAN).

Esta organización funcionó hasta la segunda mitad del siglo XX debido al crecimiento acelerado durante estas décadas, modificándose así la estructura y su tamaño, ya que la ciudad central se vio bordeada por una ciudad periférica (IMPLAN, 2015).

Entre 1940 y 1976, justo antes de que comenzara el aumento poblacional y expansión urbana, la actividad económica predominante fue la agricultura; los principales productos cosechados fueron las uvas, duraznos y guayabas, dicha actividad se complementaba con una industria textil tradicional (IMPLAN, 2015).

El crecimiento industrial comenzó en los años 1970. Para la década de 1980 se consolidó la estructura urbana e industrial del estado, la economía se orientó principalmente a satisfacer a los mercados internacionales en lugar de fortalecer los mercados regionales. La llegada de filiales internacionales como *Nissan*, *General Motors*, *Texas Instruments* y *Xerox* marcaron este auge de industrialización (Romo-Vázquez, 2012), cambiando por completo la organización y el tamaño de la ciudad.

Posteriormente, en las últimas décadas antes del nuevo siglo, la ciudad continuó con su crecimiento debido al incremento en las inversiones extranjeras de carácter maquilador, de ensamble de productos automóbiles y de aparatos electrónicos (Romo-Vázquez, 2012). Debido a estos procesos, la expansión de la ciudad fue inevitable, por lo que en 30 años pasó de 1,889.83 ha hasta 11,490.33 ha; mientras que su población aumentó de 181,277 a 747,510 hab (IMPLAN, 2015).

La ciudad pasó de ser una ciudad pequeña de provincia a un polo medio de atracción en los años 70's y 80's (IMPLAN, 2015). Esto como resultado de la implementación de las políticas nacionales de descentralización administrativa y apoyo a las ciudades medias, así como por una intensa promoción del desarrollo industrial (SEGUOT, 2014a). Dicho desarrollo fue favorecido gracias a la localización geográfica de la ciudad, siendo ésta una ventaja con respecto a otras regiones del país ya que se encuentra en un punto de fácil conexión entre las tres

ciudades más importantes del país: Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey (IMPLAN, 2015).

Uno de los acontecimientos más recientes y de gran relevancia fue la delimitación y reconocimiento oficial del polígono de la Zona Conurbana de Aguascalientes en 1996, que también incluye los municipios de Jesús María y San Francisco de los Romo, abarcando 12,600 ha (2.26% de la superficie total estatal). Esto ha resultado en un crecimiento demográfico importante en la región, ya que concentra casi el 80% de la población total del estado en una superficie de 4.77% (SEGUOT, 2014a).

En la actualidad, de acuerdo con Romo-Vázquez (2012), la estructura de la ciudad se puede explicar de la siguiente forma:

- a) Morfología urbana circular rodeada por tres anillos viales y dos límites superados, uno hacia el oeste por el río San Pedro y otro al oriente por la vía del ferrocarril (Figura 1.2a).
- b) La formación de tres grandes sectores urbanos: 1) parte central de la ciudad donde prevalece la vida urbana tradicional y en donde se asientan los poderes gubernamentales, políticos y religiosos; las actividades que predominan son los servicios y comercios (Figura 1.2b). 2) el sur y oriente de la ciudad donde se ubican las viviendas populares como los fraccionamientos López Portillo, Ciudad Morelos y Ojo Caliente, entre otros, así como los asentamientos irregulares y los vestigios de la Ciudad industrial (Figura 1.2c). 3) norte de la ciudad donde proliferan los desarrollos residenciales de ingresos medios y altos, además de la presencia de centros comerciales cerrados, centros de abasto de alimentos al mayoreo, la Secretaría de Desarrollo Económico del estado, la Universidad Autónoma de Aguascalientes y el Tecnológico de Monterrey (Figura 1.2d).

**Figuras 1.2 Extensión actual de la ciudad de Aguascalientes: (a) ciudad completa, (b) zona centro, (c) zona sureste, (d) zona noroeste**



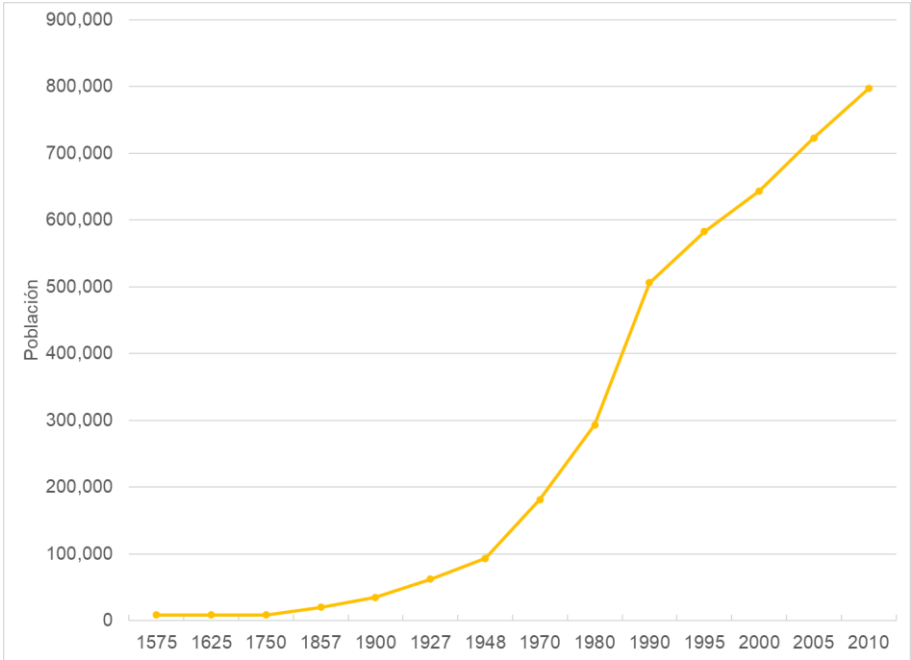
Fuente: elaboración propia con base en imagen Landsat 8 del día 20/09/2015.

### **1.6.2 Crecimiento poblacional y expansión urbana**

Una vez señalada la dinámica social y económica por la que el territorio de la ciudad pasó la segunda mitad del siglo anterior, queda mucho más clara la relación con el crecimiento poblacional. En la Figura 1.3 se observa el crecimiento de la población desde que se tiene registro en la ciudad, hasta el año 2010, así como su superficie. En los primeros años de registro no se cuenta con datos precisos de la cantidad de población, pues se asume que fue constante hasta 1750. A partir de las décadas 1970 y 1980 se registró un aumento considerable en la cantidad de habitantes de la

ciudad. Dicho aumento está directamente relacionado a las transformaciones económicas y políticas que acontecieron en aquellos años. Para principios del siglo XXI el crecimiento poblacional se ha mantenido constante.

**Figura 1.3 Crecimiento poblacional, ciudad de Aguascalientes, 1575-2010**



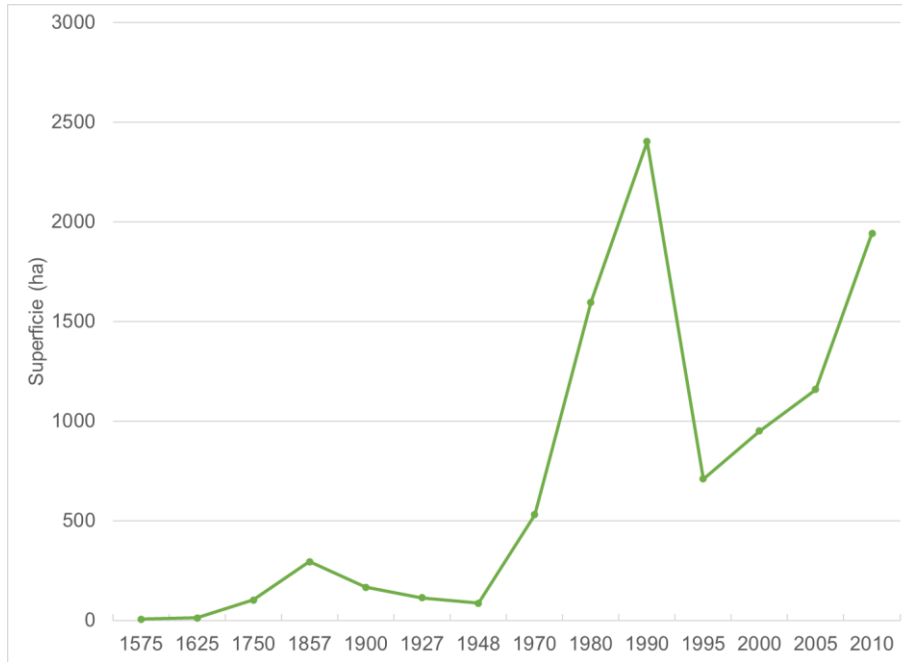
Fuente: elaboración propia con base en SEGUOT (2014).

Por su parte la superficie ha tenido cambios más drásticos que la población, ya que su crecimiento no ha sido constante. SEGUOT (2014) señala que la ciudad creció hasta los 112.62 ha hasta el año 1927 y posteriormente disminuyó a menos de 90 ha. Ya en la década de los 70's, y las dos décadas posteriores, se registró un aumento desmesurado en la expansión urbana. A mitad de la década de los 90's vuelve a registrarse un decremento considerable en la superficie, para seguir creciendo en los años 2000 (Figura 1.4).

En la actualidad se plantea que la ciudad siga creciendo para consolidar la zona metropolitana de la ciudad de Aguascalientes, pero con límites ya establecidos para evitar su crecimiento desmesurado y en lugar de ello se está apostando por la densificación en su interior. De acuerdo con las cifras presentadas por el IMPLAN

(2015), existe una densidad neta de población en la ciudad de 96.62 habitantes por ha.

**Figura 1.4 Expansión urbana, ciudad de Aguascalientes, 1575-2010**

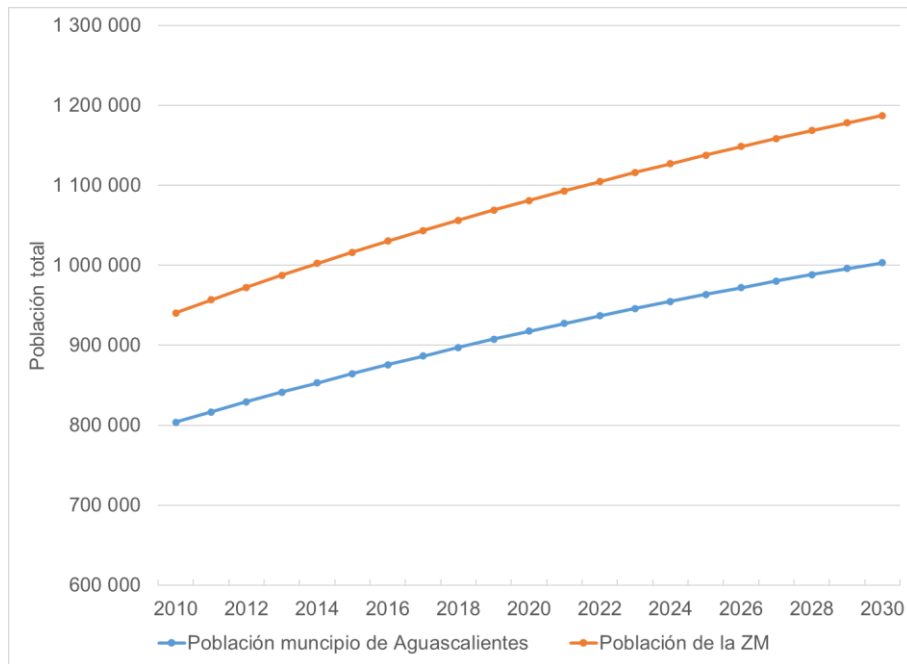


Fuente: elaboración propia con base en SEGUOT (2014).

Las cifras oficiales señalan que en el año 2010 la ciudad contaba con un total de 797,010 personas en una superficie de 1,942.26 ha SEGOUT (2014). Por su parte, CONAPO reporta los datos poblacionales para todo el municipio y para la zona metropolitana desde el año 2010, además de sus proyecciones de crecimiento al año 2030 (Figura 1.5).

Existe un incremento ligero y constante en el crecimiento dentro del municipio, pasando a las 900,000 personas hasta el año 2019 y al millón hasta el 2030. Por su parte, toda la zona metropolitana sigue un patrón similar al del municipio de Aguascalientes, ya que la gran mayoría de la población residente en la zona metropolitana proviene de dicho municipio. Al año 2014 se rebasó el millón de personas y su crecimiento continuará constante hasta sobrepasar los 1,100,000 personas en 2022 (CONAPO, 2014).

**Figura 1.5 Población total del municipio de Aguascalientes y de la zona metropolitana, 2010-2030**



Fuente: elaboración propia con base en CONAPO (2010).

### 1.6.3 Climatología

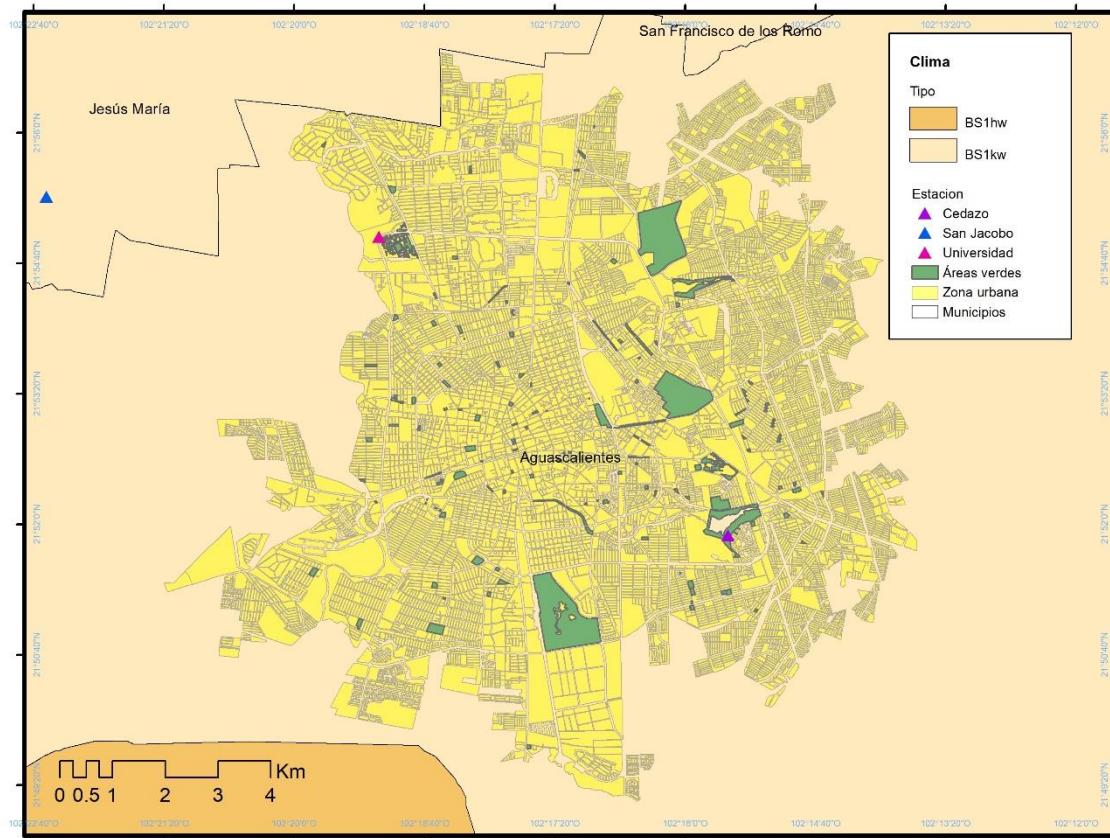
El clima dentro de la ciudad es semiárido templado con lluvias en verano (BSkw1) según la clasificación climática de Köppen modificado por Enriqueta García (Figura 1.6).

Existen 5 estaciones meteorológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) al interior de la ciudad. En este caso se seleccionó la estación Aguascalientes 1030 como la más representativa (Figura 1.7), debido a que es la estación que cuenta con un mayor número de registros (desde 1950 al presente). Se observa que el mes más cálido es mayo, llegando a los 23°C, mientras que el más frío es enero con sólo 11°C para las temperaturas promedio entre los años 1981 a 2010. Por su parte las temperaturas extremas llegan a superar los 30°C en mayo y junio y por debajo de los 6°C en diciembre y enero. La oscilación térmica



entonces es de 15.9°C en el mes más cálido, mientras que en el más frío ronda los 17°C. Anualmente la oscilación se encuentra entre los 15°C.

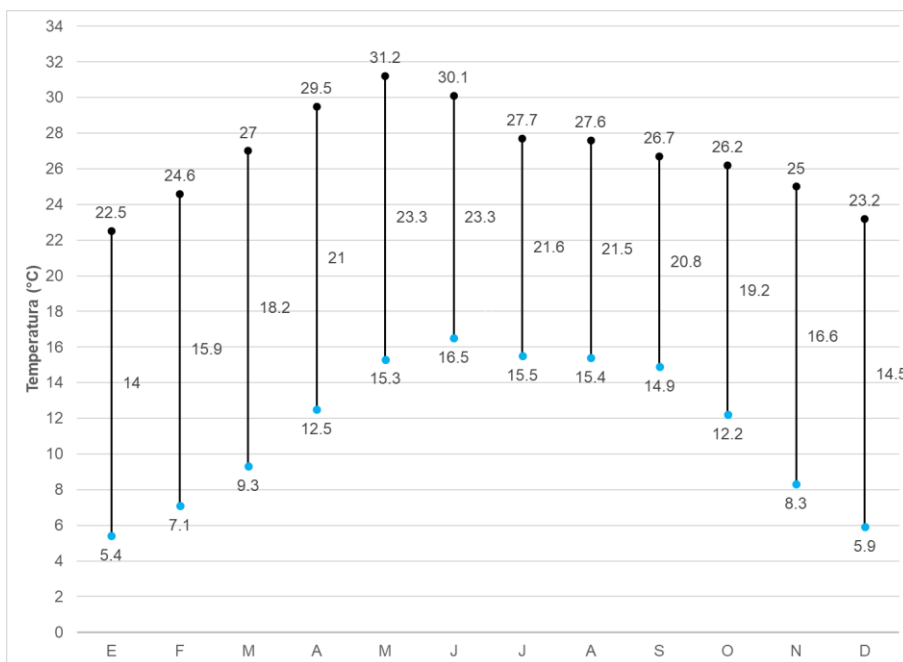
**Figura 1.6 Tipos de clima, ciudad de Aguascalientes**



Fuente: elaboración propia con base en García y CONABIO (1998).

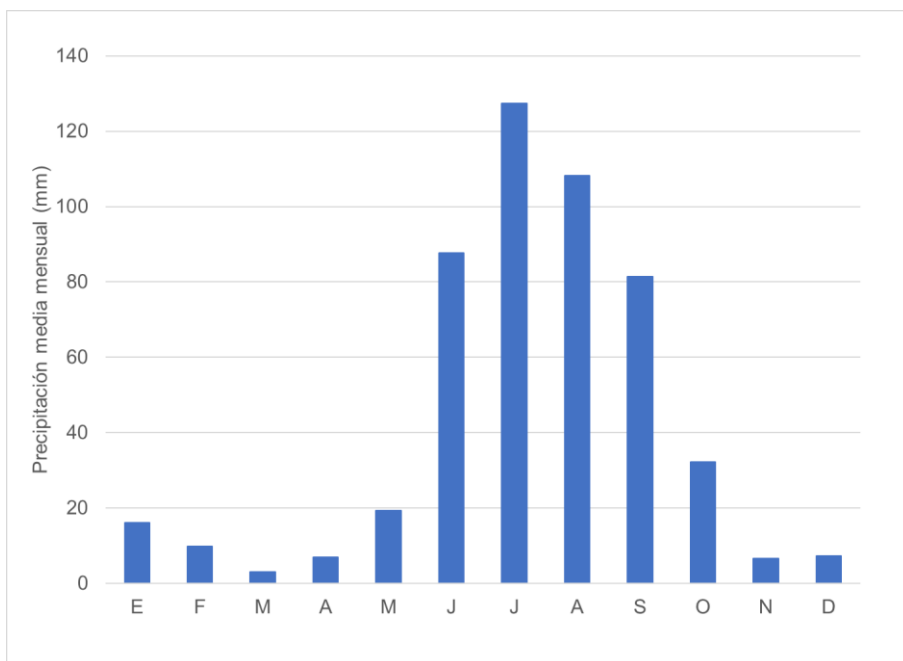
En cuanto a la precipitación, anualmente llueve un total de 506.3 mm (Figura 1.8). El régimen de lluvia es en verano, con el máximo en julio (127 mm), mientras que las estaciones de invierno y primavera son las más secas, siendo marzo el mes con menor precipitación (3 mm).

**Figura 1.7 Temperatura, Estación Aguascalientes 1030, ciudad de Aguascalientes**



Fuente: elaboración propia con base en las normales climatológicas 1981-2010 del SMN (S/F).

**Figura 1.8 Precipitación, Estación Aguascalientes 1030, ciudad de Aguascalientes**

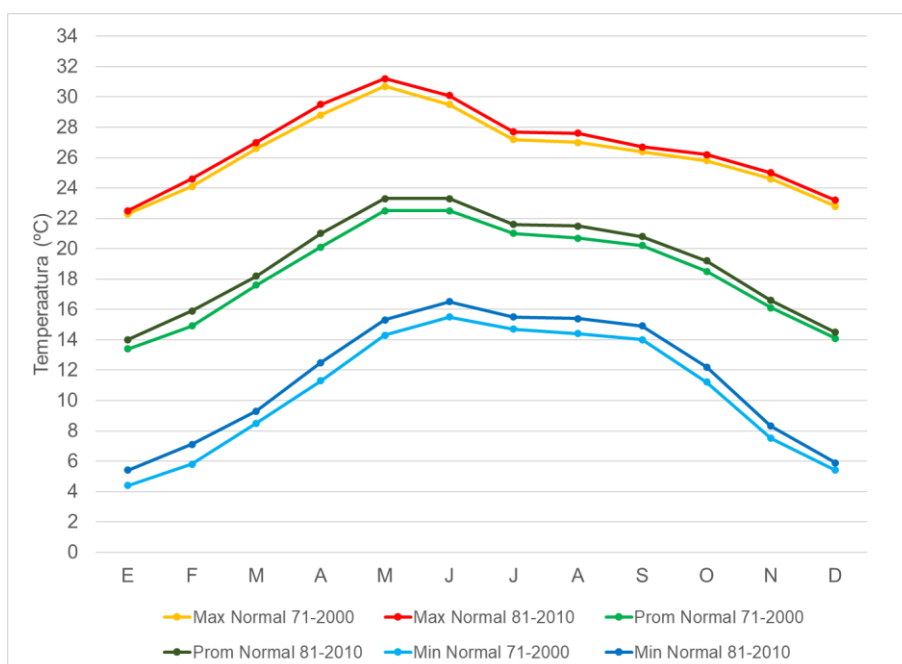


Fuente: elaboración propia con base en las normales climatológicas 1981-2010 del SMN (S/F).



La temperatura es uno de los elementos que sufre mayores cambios dentro de los espacios urbanos. En la Figura 1.9 se observan las temperaturas mínimas, máximas y promedio de las normales climatológicas disponibles para la estación Aguascalientes 1030 (de 1971 a 2000, de 1981 a 2010). Para los tres casos mencionados se observa un ligero aumento en las temperaturas registradas entre los años 1981 y 2010, siendo más evidente en las temperaturas mínimas.

**Figura 1.9 Temperaturas por normales climatológicas Estación Aguascalientes 1030, ciudad de Aguascalientes**



Fuente: elaboración propia con base en las normales climatológicas SMN (S/F).

Por su parte, para explicar el comportamiento de la humedad relativa se seleccionaron los datos del mes más húmedo (julio) y uno de los tres meses más secos (enero) para su comparación (Figuras 1.10). El ciclo diario de la humedad relativa presenta un pico alrededor de las 7:00 am donde hay menor temperatura del aire, posteriormente conforme avanza el día, la humedad va decreciendo hasta llegar al mínimo a media tarde (4:00 pm) que tiene concordancia con la temperatura máxima, y finalmente vuelve a incrementarse hacia el anochecer. Este patrón se cumple tanto para la estación urbana y rural.

**Figuras 1.10 Humedad relativa (a) enero y (b) julio en la estación Universidad (urbano) y San Jacobo (rural), 2013 y 2015**



Fuente: elaboración propia con base en datos de las estaciones meteorológicas automatizadas del INIFAP.

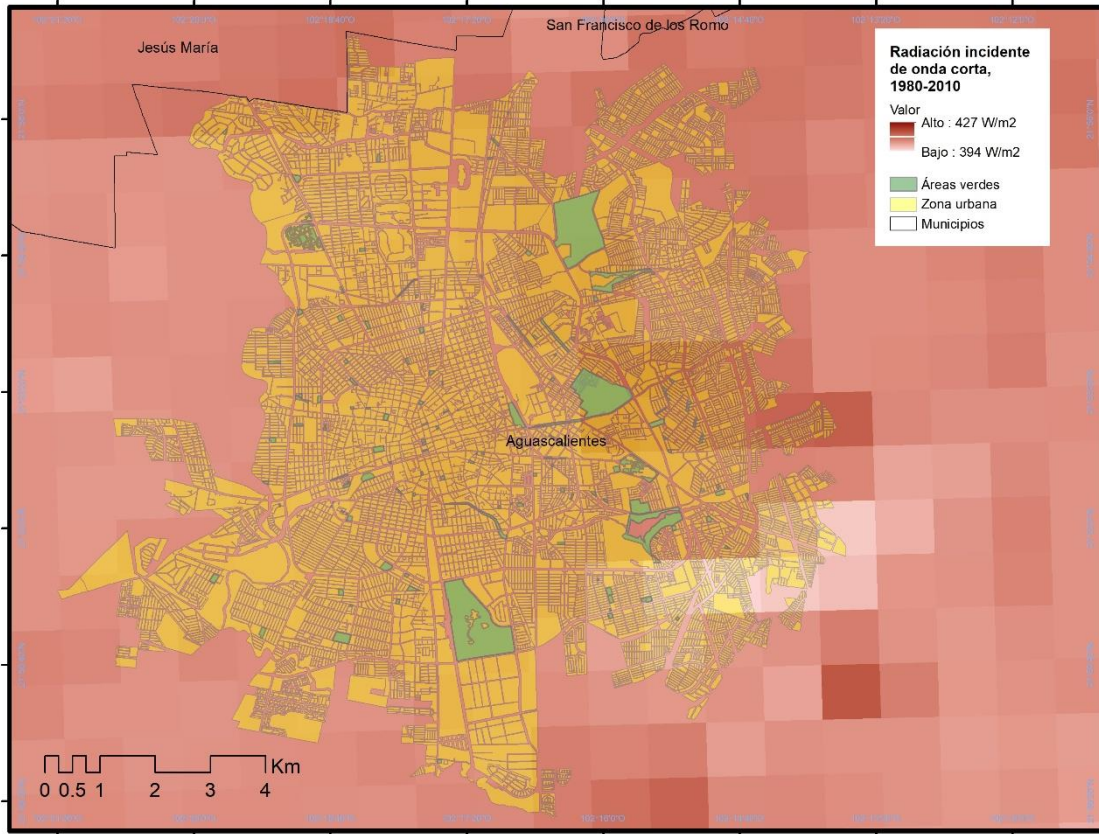
En cuanto a la variabilidad entre los dos periodos del año, de manera general se observan valores ligeramente menores en el mes de enero en comparación con julio a pesar de que este último mes es más cálido, lo que significa que otros factores tales como la presión atmosférica también tienen un rol importante en la humedad atmosférica.

Si bien en ambas estaciones el comportamiento de la humedad tiene una marcha similar, existe una diferencia considerable entre el área rural y la ciudad. En ambos meses aquí mostrados la ciudad presenta humedad más baja y que es más evidente hacia el amanecer en comparación con la estación rural. Asimismo, el año 2013 resulta ser más húmedo que 2015, por consiguiente la ciudad también es más seca que sus alrededores.

Por otro lado, para la radiación entrante de onda corta se presenta un mapa promedio (1980-2010) del flujo de radiación incidente de onda corta (Figura 1.11). Aquí se observa que la mayor parte de la ciudad tiene valores constantes (entre 408 y 410 W/m<sup>2</sup>) debido a la poca rugosidad tanto del terreno como de la misma estructura de la ciudad, sin embargo hacia el centro oriente de la ciudad, donde empiezan las montañas que bordean el valle de Aguascalientes, hay valores

ligeramente más elevados de radiación (entre 413-414 W/m<sup>2</sup>) que pueden estar asociados a laderas más expuestas sin ningún obstáculo.

**Figura 1.11 Radiación solar, ciudad de Aguascalientes**



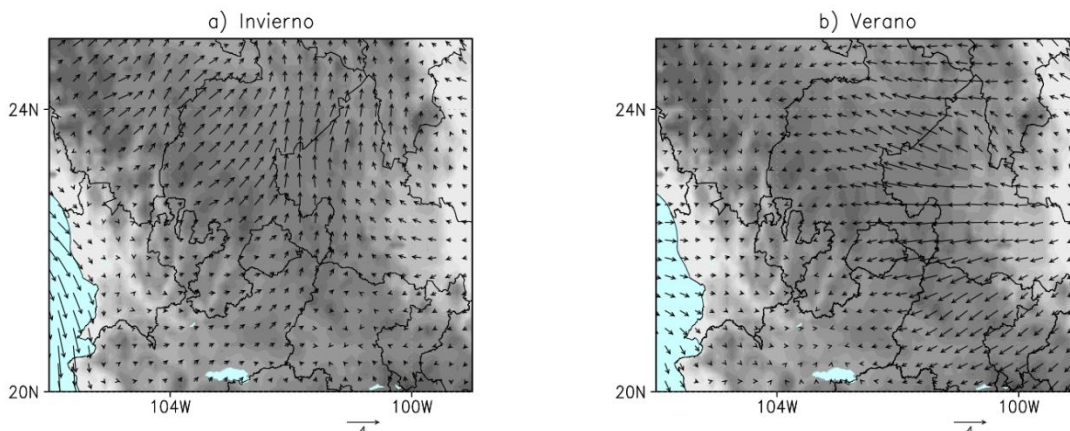
Fuente: elaboración propia con base en NASA (2020).

Para conocer la circulación general de vientos se construyeron mapas con los datos climatológicos del reanálisis ERA5. Se presentan dos mapas, uno del invierno y otro del verano, en donde se puede observar la variabilidad de la circulación de los vientos a lo largo del año (Figuras 1.12).

Durante el invierno la circulación sobre el estado va en dirección oeste-este, es decir los vientos provienen del océano Pacífico, sin embargo al encontrarse con la Sierra Madre Occidental chocan contra ésta cambiando de dirección a sur-norte, asimismo depositan parte de la humedad en la ladera occidental, por lo que al llegar a Aguascalientes son vientos más bien secos. Para el verano, la dirección del viento

se invierte, ya que ahora predomina la del este-oeste; los vientos alisios vienen cargados de humedad desde el océano Atlántico y, aunque atraviesan la Sierra Madre Oriental, continúan llevando lluvias a los estados del Altiplano mexicano como Aguascalientes, generando así los veranos lluviosos característicos del clima de la región.

**Figuras 1.12 Circulación general de vientos a 10 m de altura, (a) invierno y (b) verano, centro occidente de México**



Fuente: elaboración propia con base en datos de reanálisis ERA5 (2020).

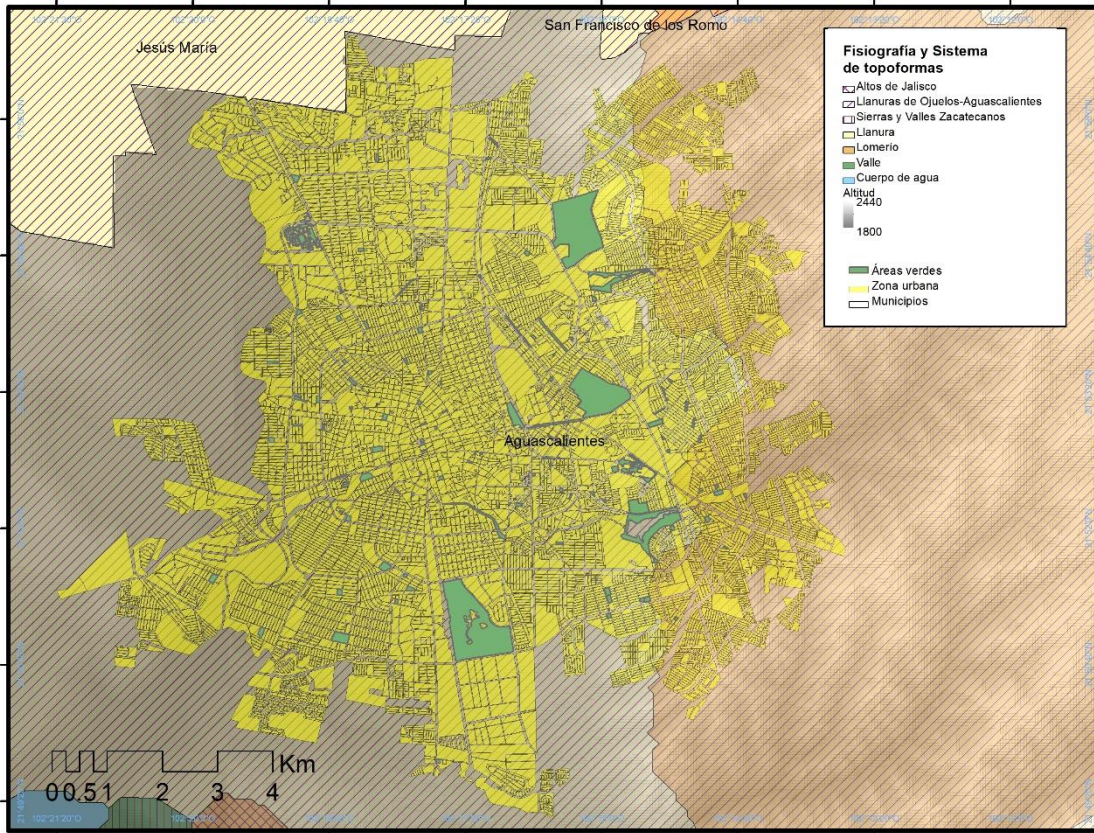
#### 1.6.4 Geomorfología

La ciudad de Aguascalientes se localiza en su totalidad dentro de la provincia fisiográfica de la Mesa del Centro (subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes) que se caracteriza por presentar llanuras extensas con altitud entre 2,000 y 2,500 m.s.n.m. (Secretaría de Programación y Presupuesto SPP, 1981).

El relieve más pronunciado se localiza en la parte oriental de la ciudad, constituido por lomeríos que alcanzan altitudes de 2,440 m.s.n.m., por su parte, en la zona central y occidental de la ciudad está situada sobre llanuras con una altitud aproximada de entre 1,800 y 2,000 m.s.n.m. (Figura 1.13).



**Figura 1.13 Fisiografía y sistema de topoformas, ciudad de Aguascalientes**



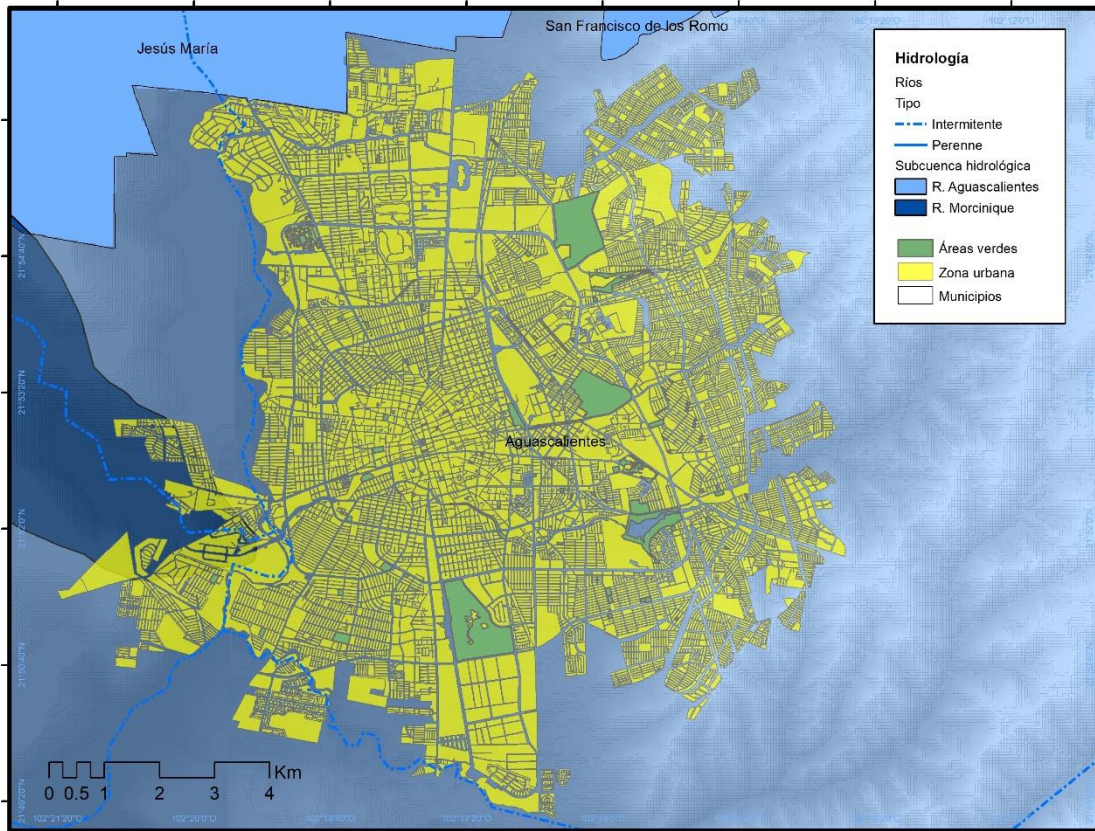
Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2016a).

### 1.6.5 Hidrología

Todo el estado se encuentra dentro de la Región hidrológica Lerma-Santiago (RH12). La cuenca hidrológica sobre la que se sitúa la ciudad es Río Verde Grande, que además abarca casi la totalidad de los demás municipios, exceptuando Calvillo y una pequeña parte de Asiento. El río más importante que cruza la ciudad de norte a sur es el Río San Pedro que se localiza al poniente (Figura 1.14) (Rodríguez-Mosqueda, 2017).

Existen dos presas para almacenar agua dentro de la ciudad: Los Gringos al noreste y El Cedazo al sureste, que en conjunto tienen la capacidad para almacenar 2,037,834 m<sup>3</sup> de agua (IMPLAN, 2015). Sus aguas son usadas principalmente para el riego de las áreas verdes.

**Figura 1.14 Ríos y subcuencas, ciudad de Aguascalientes**



Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA (1998) e INEGI (2010a).

## Capítulo 2. Marco teórico-conceptual

### 2.1 Climatología urbana

Las ciudades son una de las modificaciones más drásticas hechas por el ser humano al ambiente natural, por lo que numerosas características del entorno previo a la construcción de la ciudad tienden a transformarse, generando así cambios en el balance radiativo entre la superficie y la atmósfera. Los principales elementos que constituyen estas modificaciones son: el cambio de la cobertura natural a usos de suelo artificiales como el asfalto, la reducción de vegetación natural para dar paso a la construcción de edificios de distintas alturas, la creciente emisión de contaminantes y la alteración en el ciclo del agua, que traen consigo una transformación inadvertida al clima dentro de las ciudades. La ciencia que se encarga de estudiar la complejidad de este fenómeno llamado clima urbano es la Climatología urbana considerada por Cervantes Pérez, et al. (2001) como una rama aplicada de la Climatología.

Los orígenes de la Climatología urbana se remontan a hace aproximadamente dos siglos. De acuerdo con Oke, et al. (2017), la historia se puede resumir en cuatro fases:

- a) Hasta antes de 1930: se caracterizó por los primeros estudios en donde se evidenciaba el efecto de la contaminación al interior de las ciudades industriales y también las anomalías de temperatura. La primera obra clásica de la ciencia fue publicada por Luke Howard sobre el clima de Londres en 1833 (Howard, 1833).
- b) Desde 1930 hasta 1965: se comenzaron a implementar métodos, que ahora se denominan tradicionales, como el uso de los datos de las estaciones climatológicas situadas al interior de la ciudad o los recorridos con vehículos instrumentados propuesto por Tony Chandler en su obra *The Climate of London* publicada en 1956 (Chandler, 1965). Las ciudades que fueron objeto de estudio durante este periodo se localizaban principalmente en países europeos y en Estados Unidos.

c) Entre 1965 y 2000: hubo un aumento creciente en el estado del arte de la ciencia del clima urbano. Fue en este periodo donde surgieron los modelos físicos para estudiar la atmósfera urbana, así como la separación de ésta entre Capa del Doseil Urbano (CDU) y Capa Límite Urbana (CLU) por Oke en 1976 para facilitar su estudio.

e) Desde el 2000 hasta la actualidad: la ciencia ha madurado hasta convertirse en una ciencia predictiva, consolidándose el entendimiento del fenómeno y sus procesos. Además se han desarrollado modelos complejos capaces de simular el clima y su funcionamiento en ambientes urbanos. Aquí es donde cobra mayor importancia el uso de sensores remotos montados en satélites para estudiar a la ciudad en su totalidad.

Uno de los conceptos que se ha mantenido constante en todas las etapas de la evolución de la ciencia ha sido el del clima urbano ya que es su objeto principal de estudio. Es definido como un clima regional modificado como consecuencia de la acción humana y cuyo rasgo más destacable es el aumento de las temperaturas del aire con respecto al ambiente rural (Fernández, 2016). El proceso de urbanización que da lugar al clima urbano puede ser expresado en términos de concentración de población, cambios en los materiales constituyentes de la superficie terrestre y en la expansión de los espacios para habitar (Yamashita, 1988).

Para evaluar el impacto de la urbanización en el clima regional existen cinco métodos principales (Cervantes Pérez, et al., 2001; Oke, et al., 2017):

- a) Comparación de datos climatológicos entre estaciones urbanas, suburbanas y rurales, bajo la misma influencia de los sistemas meteorológicos de mesoescala, que son fenómenos que comprenden entre 2 y 20 km de extensión territorial con una duración temporal de horas (Orlanski, 1975).
- b) Realización de recorridos con vehículos instrumentados en transectos previamente planeados, para identificar procesos que ocurren dentro de los 200 m en el espacio y que se manifiestan de minutos a pocas horas (Orlanski, 1975; Schwarz et al., 2011).



- c) Análisis de series de tiempo para relacionar el crecimiento urbano con el clima de la ciudad en mesoescala.
- d) Análisis de imágenes satelitales en las bandas térmicas infrarrojas (*IR*), al igual que los anteriores se ubica dentro de la mesoescala.
- e) Implementación de modelos físicos o numéricos para simular los fenómenos que ocurren dentro de las ciudades, generalmente en la microescala (hasta 2 km y con duración de unos pocos minutos a algunas horas) (Orlanski, 1975).

### **2.1.1 Clima urbano e Isla de Calor Urbana**

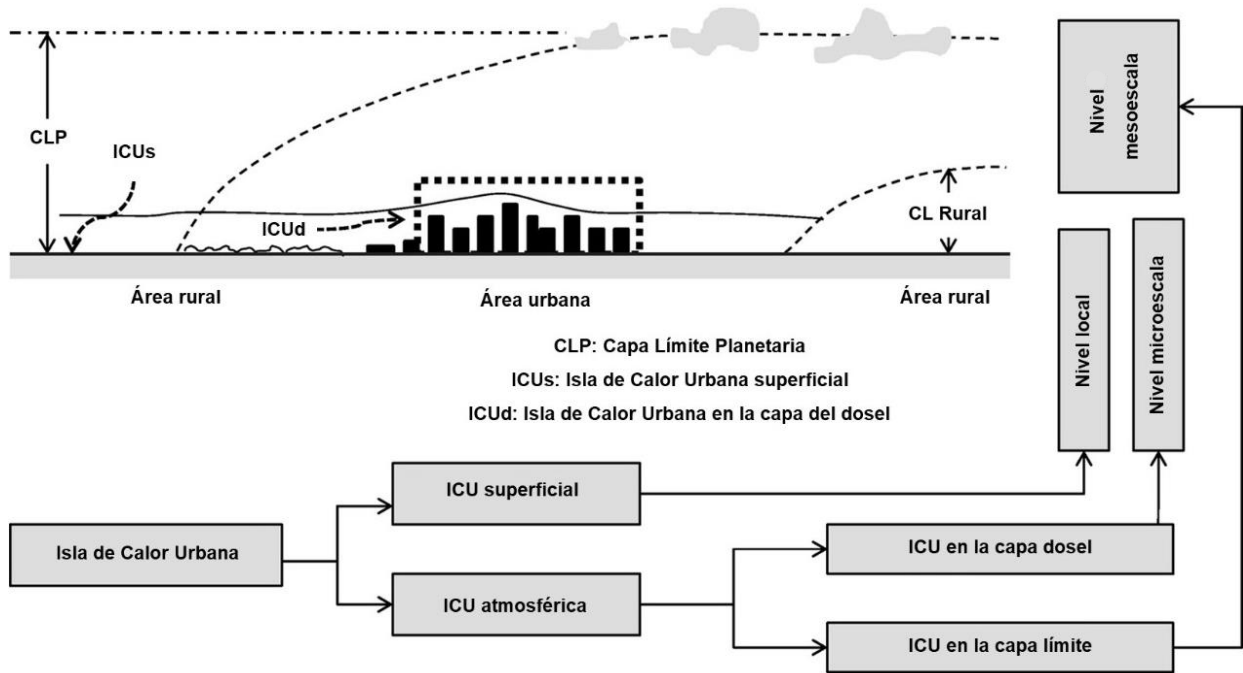
Los entornos construidos son los espacios de interés en la Climatología urbana debido a que son en éstos donde ocurren procesos únicos a nivel atmosférico que no se presentan en ningún otro ambiente. Por su complejidad, se ha convenido en separar a la atmosfera urbana (Capa Límite Atmosférica CLA/Capa Límite Planetaria CLP) en una estructura vertical coherente que permita distinguir los procesos que ocurren a diferentes alturas (Oke, 1976 en Arnfield, 2003).

La CLA (Figura 2.1) es la parte más baja de la atmósfera que está en contacto con la superficie de la Tierra, tiene una profundidad de entre 100 y 3,000 m y es controlada por la rugosidad de la superficie terrestre, la mezcla y transferencia de calor, las adiciones de humedad y contaminantes del aire superficial (Oke, et al., 2017). Aquí el enfriamiento y calentamiento del suelo a lo largo de un día fuerza la generación de remolinos superpuestos con distintos tamaños que en su conjunto se denominan turbulencia (Stull, 1988). En ambientes urbanos, ésta se divide en dos grandes capas principales:

- a) Capa del Dosel Urbano (CDU): Es el sitio donde ocurren las actividades humanas, el intercambio y transformación de energía, que es controlada a nivel microescala por las características propias del sitio y sus procesos. Comienza desde el suelo hasta la altura media de los elementos urbanos (rugosidad) como los edificios y árboles. Esta parte de la atmósfera urbana

es detectada únicamente por los sensores localizados *in situ* (Roth, et al., 1989; Arnfield, 2003; Voogt y Oke, 2003; García-Cueto, et al., 2007; Oke, et al., 2017).

**Figura 2.1 Segmentaciones de la atmósfera urbana y sus escalas de estudio**



Fuente: Elaboración propia con base en Kotharkar y Surawar (2016).

b) Capa Límite Urbana (CLU): Parte de la CLA que es influida por la presencia de la ciudad (o sus usos de suelo debajo) que se caracteriza por tener ligeros gradientes de temperatura debido a la turbulencia intensa producto del calor en superficie y de sus rugosidades, por lo que su base se localiza desde donde termina la CDU, considerándose así como un fenómeno de mesoescala observado desde los sensores remotos (Roth, et al., 1989; Arnfield, 2003; Voogt y Oke, 2003; García-Cueto, et al., 2007; Oke, et al., 2017). Esta capa tiene un comportamiento diferenciado entre el día y la noche, ya que en el día y cuando hay poco viento tiene una influencia sobre el área rural de entre 0.6 y 1.5 km, mientras que por la noche la estabilidad

en la transferencia vertical de calor sobre la ciudad hace que disminuya su influencia en los alrededores rurales hasta los 0.1 y 0.3 km (Sangines, 2013).

Ambas capas están relacionadas debido a que los procesos que ocurren en una afectan directamente a la otra y viceversa (Sangines, 2013).

Uno de los temas más importantes en los estudios de clima urbano son las islas de calor ya que es la manifestación más perceptible de éste debido a que convergen tanto las características propias del clima regional, como el exceso de calor producido por la propia ciudad y su dinámica (Yamashita, 1988).

Su origen es multicausal, ya que representa una composición de diversos factores que derivan en un calentamiento al interior de la ciudad. El principal factor es la alteración en la cubierta del suelo, ya que la urbanización elimina el suelo natural para ser reemplazado por materiales no evaporables y no porosos como asfalto y concreto (Che, et al., 2006; García-Cueto, et al., 2007). Como resultado, el calor será almacenado durante el día y re-irradiado por las estructuras urbanas al atardecer ya que los materiales y forma de construcción decremента el Factor de Vista al Cielo (FVC) lo que mantiene al calor atrapado. La rugosidad de dichas construcciones juega otro papel importante pues dificulta la remoción de calor por convección. En cuanto al albedo, presenta valores bajos debido a los típicos cañones urbanos que reducen la capacidad de liberar calor por radiación de onda larga. Finalmente se encuentra la vegetación que usualmente cubre un porcentaje muy bajo dentro de las ciudades, por lo que exhibe poco calor latente de vaporización (Rizwan, et al., 2008; Sangines, 2013).

Otro elemento que se debe considerar es la población que reside o transita en las ciudades. Se le conoce como calor antropogénico y tiene un efecto directo y otro indirecto: a mayor concentración de personas, se traducirá en más metabolismo; asimismo, la gran cantidad de personas liberarán más calor por el uso de vehículos, más construcción de edificaciones y fábricas, entre otros (García-Cueto, et al., 2007; Rizwan, et al., 2008).

La consecuencia directa de todos los procesos antes descritos es un aumento en la temperatura del aire dentro de las ciudades con respecto a los ambientes menos urbanizados o completamente rurales alrededor de la ciudad, término acuñado como Isla de Calor Urbana (ICU) (Yamashita, 1988; Oke, 1995; Cervantes Pérez, et al., 2001; Voogt y Oke, 2003; García Cueto, et al., 2007; Rizwan, et al., 2008; Sobrino, et al., 2013; Oke, et al., 2017). El fenómeno fue denominado como “Isla” debido a que los patrones de isotermas cerca de la superficie se asemejaban al contorno de las islas en el mar con los alrededores más fríos (Oke, 1995; Oke, et al., 2017). No obstante, en ciudades grandes, con una importante heterogeneidad en usos de suelo, este patrón de isla se ve distorsionado porque se presentan cambios drásticos en la distribución espacial de isotermas.

Muchos son los efectos adversos asociados a la presencia de la ICU, algunos de los más evidentes son el deterioro del ambiente vivido, el incremento de la energía consumida ya sea para enfriar o calentar los espacios intramuros, por lo tanto afectaciones en el confort térmico, elevación de las emisiones de ozono troposférico, aumento en la morbilidad producto de la contaminación atmosférica y del calor generado al interior de la ciudad, entre otros (Roth, et al., 1989; Rizwan, et al., 2008).

A lo largo de los años, el estudio de la ICU se ha profundizado y diversificado a tal grado de que se han clasificado diversos tipos de islas que responden a dinámicas espaciales y temporales específicas que le otorgan complejidad a su estudio (Voogt y Oke, 2003; García-Cueto, et al., 2007). Cada tipo responde a la configuración de distintas escalas con orígenes en procesos mezclados que requieren diferentes esquemas de monitoreo para su medición y modelación. De acuerdo con Oke, et al. (2017), se reconocen cuatro tipos:

- a) ICU superficial: representada por las diferencias de temperatura en la interfaz de la atmósfera exterior con los materiales sólidos de la ciudad y los alrededores no urbanos a la misma altitud. Los sensores montados en aviones o satélites muestran que su magnitud es mayor durante tiempo en calma, despejado y por las noches cuando las diferencias de

enfriamiento radiativo se maximizan entre los ambientes rurales y las zonas urbanas (Voogt y Oke, 2003).

- b) ICU subsuperficial: Producto de las diferencias entre los patrones de temperatura en el suelo debajo de la ciudad, incluyendo los suelos urbanos, con respecto a los suelos en las zonas rurales.
- c) ICU atmosférica: Diferencias en la temperatura del aire contenido en la CDU y las temperaturas en ambientes rurales a la misma altura. Es la que comúnmente se estudia.
- d) ICU en la Capa Límite Urbana: Producidas por las diferencias de temperatura del aire en la capa entre el tope de la CDU y el tope de la CLU con respecto a las temperaturas observadas a la misma altura en ambientes menos urbanizados.

En épocas recientes también se ha investigado otro fenómeno particular inverso a la ICU que es la Isla Fría Urbana (IFU) definida como la presencia de una temperatura superficial más baja en el centro de la ciudad con respecto a los alrededores rurales (Shigeta, et al., 2011 en Rasul, et al., 2016); se habla de una temperatura superficial porque usualmente es con los sensores remotos con los que se identifica la existencia de ésta. La presencia de las IFUs se ha asociado a la alta evaporación de agua del suelo dentro de las ciudades, ya que de este modo se reduce considerablemente la temperatura superficial a través del flujo de calor latente, por lo que es característica de climas secos y semisecos (Schwarz, et al., 2012; Rasul, et al., 2016; Rasul, et al., 2017).

En esta investigación se utilizaron 3 métodos distintos para el estudio en diferentes estratos de la atmósfera urbana (ICUs, ICU atmosférica e ICU en la CLU).

Para el estudio de la primera fue necesario llevar a cabo múltiples procesos con el uso de imágenes satelitales en las bandas IR. La recuperación de la emisividad y de temperatura de superficie tiene aplicaciones tanto en estudios de clima urbano como ambientales, principalmente para relacionar las características de la superficie con los valores obtenidos de éstas, estudiar los flujos de energía superficial,

caracterizar las propiedades del paisaje, de sus patrones y procesos, así como para el estudio de la ICU (Quattrochi y Luvall, 1999 en Weng, 2009).

En cuanto a la segunda se emplearon los datos de estaciones meteorológicas ubicadas al interior y exterior de la ciudad para comparar las diferentes temperaturas del aire.

Finalmente, para la parte de las temperaturas en la CLU se utilizó el modelo CALMET, que es un modelo de diagnóstico meteorológico para obtener campos de temperatura en tres dimensiones dentro y en los alrededores de la ciudad; de esta forma se pudo representar a diferentes alturas dentro de la atmósfera el ambiente urbano y su contraparte rural.

## **2.2 Percepción remota y clima urbano**

Como bien se menciona líneas atrás, los métodos tradicionales en el estudio del clima urbano han sido a través del uso de datos tomados en superficie por estaciones fijas o por transectos previamente establecidos. A pesar de que estos métodos han tenido una extensa aplicación en los estudios de Climatología urbana, lo cierto es que tiene limitantes importantes a la hora de ser llevados a cabo. La principal y más importante es la falta de dichos datos, ya sea por la inexistente red de estaciones al interior de la ciudad o por su falla, así como la no disponibilidad de vehículos o sensores para equiparlos, lo que complica de manera importante su implementación. Además, cabe resaltar que los datos proporcionados tienen una escasa resolución espacial, por lo que es necesario casi en todos los casos llevar a cabo interpolaciones (García-Cueto, et al., 2007).

Frente a estas dificultades, la llegada de los sensores remotos térmicos montados en plataformas satelitales o aeronaves proporcionaron nuevas vías para el estudio del clima urbano gracias a la combinación de teledetección térmica y de micrometeorología urbana (Voogt y Oke, 2003). Las técnicas de percepción remota generalmente proporcionan una mayor cobertura espacial, continua y simultánea de la ciudad en comparación con los datos de las estaciones en superficie (Weng,

2009), además ofrecen la posibilidad de trabajar en diferentes escalas espaciales, desde el nivel local/urbano, nacional o incluso mundial (Tomlinsonch, et al., 2011), pero algunos sensores siguen careciendo de una buena cobertura temporal (García-Cueto, et al., 2007).

Fue en la década de los 70's cuando Rao demostró que las islas de calor podían ser identificadas desde los datos térmicos infrarrojos adquiridos por los satélites (Che, et al., 2006). Posteriormente, cuando se extendió el uso de sensores remotos, uno de los que cobró mayor importancia por su disponibilidad fue el NOAA AVHRR, aunque sus datos fueron útiles únicamente para mapear la temperatura en un área urbana extensa y no para establecer medidas precisas o comparables con los valores registrados en superficie (Che, et al., 2006; Weng, 2009). Pero conforme avanza la tecnología de sensores remotos, ha sido posible medir con mayor precisión las características propias del clima urbano.

Cabe aclarar que el uso de sensores IR también presenta desventajas, debido a que es una medición indirecta (estimativa), es necesario considerar efectos complementarios a la radiación electromagnética recibida. Tres son los efectos principales por corregir (Dash, et al., 2002; Voogt y Oke, 2003; Tomlinsonch, et al., 2011):

- a) Efectos atmosféricos: absorción, reflexión o refracción y dispersión que pueden afectar la cantidad de energía electromagnética captada.
- b) Efectos angulares: variación en el ángulo de visión que resulta en un desplazamiento de las longitudes de onda medidas.
- c) Efectos en la emisividad: las propiedades intrínsecas de los elementos en superficie jugarán un papel importante en la cantidad de emisividad recibida (Véase apartado 2.2.1).

Sangines (2013) reconoce que no es una tarea fácil estudiar el clima urbano de forma remota, a pesar de ello, la implementación de la Percepción Remota en la Climatología urbana ha dado para publicar y probar múltiples métodos para obtener de forma precisa uno de los elementos más destacables del clima urbano, la Isla de Calor Urbana.

### 2.2.1 Estimación de la Emisividad de Superficie

La emisividad, con una longitud de onda y temperatura dada, es definida como la relación entre la radiancia emitida por un cuerpo a una determinada temperatura y la radiancia emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura (Li, et al., 2013a). Es una propiedad intrínseca a la naturaleza de los materiales (Li, et al., 2013a), por lo que su obtención estará controlada por factores como el contenido de agua, la composición química, estructura y rugosidad (Snyder, et al., 1998 en Weng, 2009).

La estimación directa de la emisividad de superficie (ES) desde los sensores pasivos es imposible debido a los efectos combinados de la temperatura y la emisividad de superficie, o de la contribución atmosférica (Li, et al., 2000 en Li et al., 2013a), ya que la radiancia emitida por la superficie en la región IR es una función de la temperatura y emisividad de acuerdo con la Ecuación de Transferencia Radiativa (ETR).

Existen múltiples métodos para calcular la emisividad de superficie, algunos la obtienen al mismo tiempo que la temperatura de superficie (TS), aunque la mayoría de ellos necesitan derivarla *a priori* para continuar con la temperatura de superficie. Varios artículos han hecho una compilación de métodos empleados en su obtención (Dash, et al., 2002; Weng, 2009; Li, et al., 2013a). En general, la estimación de ES se concentra en tres grandes grupos:

- a) Métodos semi-empíricos: Se estima la ES desde una tabla de consulta basada en la clasificación de coberturas de suelo comunes o mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* NDVI por sus siglas en inglés). Este método fue propuesto en 1993 por Van de Griend y Owe, los cuales, a través del Programa de Investigación en Balance de Agua y Superficie en Botswana, encontraron una alta correlación entre ES en la banda entre 8-14  $\mu\text{m}$  y el NDVI. La ecuación propuesta fue obtenida a partir de un análisis de regresión (Dash, et al., 2002; Sobrino et al., 2004).
- b) Métodos de estimación de Temperatura/Emisividad multi-canal: Se recuperan la TS/ES desde la radiancia de la superficie. Aquí se agrupan



los métodos basados en caracteres del espectro de emisividad, los métodos del canal de referencia, los de emisividad normalizada, los de Temperatura y Emisividad simultánea y los métodos de índices espectrales de temperatura independiente.

- c) Métodos apoyados físicamente: Estos algoritmos añaden incógnitas adicionales a la recuperación de la TS y ES debidas a la absorción y emisión espectral de la atmósfera media.

Cada una de las técnicas presentadas se asocia ventajas y desventajas. Generalmente éstas últimas son debidas a la simplificación del método, al ruido del instrumento y el error en la calibración, sumado a las incertidumbres en la estimación de la irradiancia descendiente y a la información sobre la atmósfera poco precisa (Li, et al., 1999 en Dash, et al., 2002).

### **2.2.2 Estimación de la Temperatura de Superficie**

Aunado a su aplicación dentro de la Climatología urbana, la TS se ha aplicado también para comprender las variaciones temporales y espaciales del estado de equilibrio de la superficie, lo que se traduce en un conocimiento directo para el estudio de la evapotranspiración, cambio climático, ciclo hidrológico o monitoreo de la vegetación (Li, et al., 2013b).

Se origina en la capa inferior de la atmósfera y es causada principalmente por la radiación de las superficies urbanas y su respectivo intercambio de energía, así como al calor antropogénico (Voogt, et al., 1998 en Sangines, 2013), además guarda una relación estrecha con la distribución de las coberturas y usos de suelo dentro de la ciudad (Weng, 2009). Es definida usando la radiancia emitida por la superficie, también conocida como *Skin temperature* (Dash, et al., 2002) que corresponde a la radiación emitida desde las profundidades inferiores a la profundidad de penetración de una longitud de onda dada (Li, et al., 2013b).

La TS cobra relevancia en los estudios de clima urbano debido a que es la responsable de modular la temperatura del aire en las capas bajas de la atmósfera

y es el principal factor en determinar la radiación de la superficie y los intercambios de energía, así como el clima al interior de las construcciones y el confort humano (Voogt y Oke, 1998 en Weng, 2009).

Al ser observada desde los sensores remotos, la TS depende de la distribución de la temperatura y emisividad dentro del píxel y de la medida del canal del espectro, por lo que representa el efecto integrado de todo el conjunto dentro de un píxel (Becker y Li, 1995 en Dash, et al., 2002).

Usualmente los algoritmos para obtener la TS necesitan conocer la ES *a priori*, ya que la falta de su conocimiento por cobertura de suelo puede acarrear errores en la estimación (Dash, et al., 2002). Su obtención directa resulta complicada debido a que no sólo depende de parámetros superficiales, sino que se le adiciona los efectos de la atmósfera (Li et al., 2013b).

Al igual que con la ES, se han desarrollado numerosos métodos para recuperar la TS. Li, et al. (2013b) entre otros (Dash, et al., 2002) los han clasificado en tres grandes grupos dependiendo de si se cuentan con los datos de emisividad.

a) Conociendo la emisividad *a priori*:

El método de único canal utiliza la radiancia medida por el satélite en ese canal que fue elegido dentro de una ventana atmosférica. Hace uso del inverso de la ETR y necesita de una corrección atmosférica.

El método de multi-canal utiliza la absorción atmosférica diferenciada en dos canales adyacentes localizados dentro del espectro entre 11 y 12  $\mu\text{m}$ .

El método multi-ángulo se basa en la absorción atmosférica diferencial debida a las diferencias longitudinales de trayectoria cuando se observa el mismo objeto en un canal dado desde diferentes ángulos de visión.

b) Sin conocer la emisividad *a priori*:

Aquí se incluye el método de recuperación gradual que consta de dos pasos: primero es necesario determinar la ES empíricamente desde el canal visible/cercano IR o estimada físicamente desde la radiancia

atmosféricamente corregida del IRM y IR a nivel de suelo. Posteriormente la TS es estimada usando cualquiera de los métodos arriba descritos.

La recuperación simultánea de ES y TS con datos atmosféricos surge bajo la premisa de que la TS es dependiente de la precisión de la ES. Dentro del grupo existen varios algoritmos que se dividen en dos categorías: la recuperación multitemporal que usa las mediciones en distintos tiempos para obtener ambas, asumiendo que la emisividad es invariable en el tiempo, y la recuperación multiespectral que se basa en el comportamiento espectral intrínseco de la ES en lugar de la información temporal.

c) Recuperación simultánea de TS, ES y perfiles atmosféricos:

Aunque es complicado utilizar este método debido a que es necesario obtener el perfil de la atmósfera al mismo tiempo que la medición registrada por el satélite, obtenerlo ofrece mayor precisión en las estimaciones.

No existe un método universalmente aceptado para estimar TS ya que cada uno fue propuesto bajo diferentes condiciones y con diferentes supuestos (Li, et al., 2013b). Por lo que el uso de uno u otro debe tomar en cuenta la disponibilidad de los datos necesarios para su aplicación.

### **2.3 Modelación y clima urbano**

La modelación dentro de la Climatología urbana ha tenido un crecimiento constante en las últimas décadas, ofreciendo cada vez más precisión, menor costo y mayor acercamiento a la realidad modelada. En la actualidad existe una importante cantidad de modelos para estudiar a diferentes escalas los procesos térmicos, energéticos, de dispersión de contaminantes o hidrológicos dentro de las ciudades. Cada uno de ellos ofrecerá ventajas y desventajas, sin embargo, sus propiedades los han colocado como uno de los métodos que los científicos buscan implementar en sus investigaciones, así como continuar innovando en nuevos modelos más complejos.

De acuerdo con Oke, et al. (2017) las ventajas de utilizar modelos dentro de la Climatología urbana se relacionan con la posibilidad de tener un control total o parcial de las variables a modelar, así como el poder estudiar diferentes escalas espaciales, yendo desde un cañón urbano, hasta la ciudad por completo. En contraparte, las desventajas pueden asociarse al equipo necesario para utilizar modelos, por ejemplo un equipo de cómputo con alta capacidad de procesamiento para soportar su ejecución, túneles de viento, o incluso maquetas de la ciudad. Además se suma que la modelación puede alejarse de la realidad, arrojando resultados no aplicables.

Existen modelos físicos y modelos numéricos. Los primeros permiten realizar modelaciones con experimentos cuasi-controlados para simular los efectos climáticos en las variables del sistema; aquí se construyen a escala los elementos urbanos como edificios, árboles, o se modelan condiciones dentro de un laboratorio completamente controlado. Los segundos se encargan de resolver una serie de ecuaciones que vinculan propiedades a procesos, por ejemplo la temperatura del aire a la densidad del flujo de calor sensible (Oke, et al., 2017).

Por su gran variedad, los modelos numéricos se han agrupado en dos tipos dependiendo de la escala que abordan (Oke, et al., 2017):

- a) Modelos de escala micro-local: se enfocan en el estudio de la CDU.  
El modelo computacional de dinámica de fluidos aplicado a ciudades es utilizado para modelar el flujo de aire alrededor de obstáculos como construcciones.  
El modelo de balance de energía ha tenido un fuerte desarrollo en la ciencia. Generalmente se incorpora la estructura urbana como los cañones urbanos para representar las calles de las ciudades.
- b) Modelos urbanos de mesoescala: estudian la CLU y su interacción con la superficie urbana subyacente. Tienen un dominio horizontal importante en el que generalmente se abarca a toda la ciudad.

Los modelos climáticos urbanos acoplados son modelos anidados que incorporan un modelo de mesoescala (que englobe a la ciudad) con un modelo de escala local adecuado para realizar interpolaciones.

### **2.3.1 Modelo CALMET**

Uno de los modelos numéricos que puede utilizarse en el campo de la Climatología urbana, aunque no se haya desarrollado con esa finalidad en un principio, es CALMET que consiste en un modelo de diagnóstico y pronóstico meteorológico que a su vez se agrupa dentro del modelo CALPUFF (Scire, et al., 2000). Se utiliza en una gran variedad de investigaciones relacionadas con la modelación de la calidad del aire, así como para el estudio del transporte, dispersión y deposición de contaminantes atmosféricos (Fonseca-Hernández, et al., 2015). Por lo que la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (*Environmental Protection Agency* EPA por sus siglas en inglés) recomienda su uso para modelar la calidad del aire (EPA, 2020).

Para estudiar la dispersión de contaminantes CALPUFF requiere leer y procesar datos meteorológicos, cuya función sea complementar el entendimiento de la atmósfera en diferentes contextos y que son proporcionados desde CALMET.

Así, CALPUFF integra 3 componentes: el modelo meteorológico tridimensional (CALMET), una pluma de dispersión de contaminantes Gaussiana (CALPUFF) y programas de posprocesamiento (CALPOST); además de contar con módulos específicos para datos geofísicos, para procesar datos meteorológicos y para leer datos de salidas de otros modelos de pronóstico (Scire, et al., 2000; Pereyra-Castro, 2017).

CALMET entonces, es un modelo meteorológico capaz de producir campos de viento, temperatura, humedad relativa y altura de la capa límite de forma horaria en una malla tridimensional que constituye el dominio de modelación, así como la estructura espacial de la altura de la capa de mezcla, de las características de la superficie y las propiedades de dispersión (Scire, et al., 2000; Hernández-Garces,

et al., 2017). Una de sus características a destacar es que cuenta con diversas parametrizaciones que le permite tener más precisión a la hora de producir los campos meteorológicos (Fonseca-Hernández, et al., 2015). Las ecuaciones que utiliza el modelo se basan en las leyes de la física de los fluidos que definen distribuciones de flujo de aire que son consistentes con los efectos del terreno, los gradientes de temperatura y otros procesos físicos que determinan el movimiento y la mezcla del aire (Scire, et al., 2000).

Dentro de CALMET se encuentra un módulo de diagnóstico de campos de viento y otro para el cálculo de la altura de la capa de mezcla (Scire, et al., 2000; Hernández-Garces, et al., 2017). Para el primero, se ejecuta en dos etapas:

- a) El campo de vientos inicial se ajusta a los efectos cinemáticos del terreno, a los flujos en la pendiente y a los efectos de bloqueo del terreno.
- b) Posteriormente, en un análisis objetivo se introducen las mediciones en el campo de viento del primer paso, para obtener un campo de viento final.

En cuanto al módulo micrometeorológico de capa límite, existen dos variantes, una sobre cuerpos de agua y otra sobre tierra (Hanna, et al., 1986 en Scire, et al., 2000):

- a) Sobre agua: las propiedades aerodinámicas y térmicas de las superficies acuáticas hacen que el método del perfil sea el más apropiado, y el que CALMET utilice, debido a que emplea las diferencias entre las temperaturas del océano y el continente.
- b) Sobre tierra: se utiliza el método de balance de energía propuesto por Holtslag y van Ulden (1983) para calcular los campos de la malla por hora de los flujos de calor sensible, la velocidad de superficie de fricción, la longitud de Monin-Obukhov y la escala de la velocidad convectiva. Posteriormente la altura de la capa de mezcla se determina por el método de Maul (1980) que es una modificación del propuesto por Carson en 1963 y consiste en obtenerla desde el flujo horario de calor superficial calculado y las temperaturas observadas de los radiosondeos.

Para poder construir los campos de viento, temperatura y proporcionar la altura de la capa de mezcla, CALMET ofrece una serie de posibilidades y combinaciones de datos de entrada para implementar los métodos mencionados arriba. De acuerdo con Pereyra-Castro (2017), el modelo puede correr en 3 modos distintos, ya sea que utilice únicamente como datos de entrada las salidas de modelos de pronóstico sin observaciones en superficie, empleando sólo estaciones meteorológicas o en modo híbrido donde incorpore observaciones y salidas de modelos de pronóstico; éste último es el más complejo y más completo que los dos primeros.

Para trabajar todos estos datos, el modelo cuenta con una serie de preprocesadores para ejecutarse (Fonseca-Hernández, et al., 2015; Pereyra-Castro, 2017):

- a) CALETA/CALMM5/CALWRF: se emplea para leer e integrar los datos provenientes de estos modelos de pronóstico a CALMET.
- b) TERREL: introduce los datos de elevación del terreno en puntos de una malla.
- c) CTGPROC: introduce los datos de cobertura y uso de suelo en puntos de una malla.
- d) MAKEGEO: preprocesador geofísico final que une los archivos de elevación del terreno y de cobertura y uso de suelo en uno solo para ser leído por CALMET.
- e) SMERGE: prepara los datos de estaciones meteorológicas en superficie para ser leídas por el modelo.
- f) PMERGE: para datos de precipitación.
- g) READ62: procesa datos de radiosondeos.
- h) BUOY: procesa datos de boyas marinas.

## **2.4 Antecedentes investigativos**

En esta parte del capítulo se explora los antecedentes investigativos de los métodos que se utilizaron en la tesis. Se decidió incluir únicamente los de México (Tabla 2.1) debido a que en áreas como la percepción remota e ICU, los trabajos realizados a nivel mundial son numerosos y el objetivo del apartado no es realizar un conteo

minucioso de las investigaciones, sino visibilizar la carencia de investigaciones de este tipo en las ciudades mexicanas medianas y pequeñas.

**Tabla 2.1 Antecedentes investigativos en México**

<b>Isla de Calor Urbana Superficial</b>	<b>Isla de Calor Urbana atmosférica</b>	<b>Modelo CALMET</b>
García Cueto, et al. (2007) en la ciudad de Mexicali	Barradas (1987) en la ciudad de Xalapa	Pereyra-Castro (2017) en Xalapa
Cui y De Foy (2012) en ciudad de México	Barradas (1991) en ciudad de México	
Soto-Díaz y Pérez-Ruiz (2015) en ciudad Juárez	Jáuregui, et al. (1992) en la ciudad de Guadalajara	
(IMPLAN, 2015) en ciudad de Aguascalientes	Jáuregui (1997) en la ciudad de México	
	Cervantes, et al. (2001a) en la ciudad de Xalapa	
	Romero Dávila, et al. (2011) en la ciudad de Toluca	
	Colunga, et al. (2015) en la ciudad de Querétaro	
	Luyando (2016) en la ciudad de México	
	Lemus-Flores (2016) en la ciudad de Puebla	

Fuente: elaboración propia.

Como se ha mencionado previamente, las aportaciones dentro del ámbito de la Climatología urbana e ICU con percepción remota han sido abundantes alrededor del mundo desde varias décadas atrás, no obstante, en México se ha tenido un crecimiento lento. Aun así, es posible citar trabajos como el de García Cueto, et al. (2007) en el cual se determinó la ICUs y su relación con el uso de suelo en Mexicali, Baja California con imágenes térmicas del satélite NOAA AVHRR y Landsat; el de Cui y De Foy (2012) que analizaron la ICUs estacional con imágenes MODIS y con



observaciones meteorológicas de superficie, además de modelar el impacto de la vegetación sobre la ICU de la Ciudad de México; y el de Soto-Díaz y Pérez-Ruiz (2015) para Ciudad Juárez en Chihuahua en donde también emplearon imágenes MODIS en 2014 para demostrar la presencia de una ICUs que está influida por la temporada del año.

El uso de estaciones meteorológicas o de recorridos dentro de la ciudad con vehículos instrumentados ha sido el método más extendido en el estudio de las ICU en México. Algunos de los trabajos a destacar dentro de este rubro son los de Barradas (1987) en la ciudad de Xalapa, Jáuregui, et al. (1992) en Guadalajara, Jáuregui (1997) en la Ciudad de México, Romero Dávila, et al. (2011) en Toluca, Colunga, et al. (2015) en la ciudad de Querétaro, Luyando (2016) en la ciudad de México o el de Lemus-Flores (2016) en la ciudad de Puebla. Todos ellos cuantificaron las ICU atmosféricas en diferentes climas, épocas del año y temporalidad.

El modelo CALMET presentado con anterioridad funciona para estudiar la dispersión de contaminantes, sin embargo en esta investigación se utilizó por su capacidad para generar campos de temperatura en tres dimensiones. No se encontró ningún antecedente en México en donde se haya utilizado en estudios de clima urbano a excepción de Pereyra-Castro (2017) en donde se empleó con el fin de estudiar los campos de viento para la ciudad de Xalapa en Veracruz.

De manera más concreta, para la ciudad de Aguascalientes no existe ningún estudio formal que tenga como principal objetivo demostrar y medir la ICU, sin embargo, de acuerdo con el Programa de Desarrollo Urbano de la Ciudad de Aguascalientes 2040 (IMPLAN, 2015) se menciona que en la ciudad de Aguascalientes se presenta el fenómeno ICU. Dicha aseveración es justificada con el análisis de una imagen Landsat de noviembre de 2005 en la que se observan temperaturas de superficie superiores a 40°C en las zonas más densamente construidas al oriente de la ciudad, mientras que alrededor de los parques urbanos la temperatura de superficie desciende hasta los 15°C. No obstante, este trabajo no ofrece suficiente evidencia

para considerarse como concluyente en el área de la Climatología urbana porque no especifica la metodología empleada.

## Capítulo 3. Metodología

### 3.1 Datos

Este capítulo aborda la descripción de las bases de datos utilizadas en la investigación, así como los métodos aplicados para obtener los resultados requeridos. En primera instancia se detalla la adquisición de las imágenes satelitales. Posteriormente los datos que el modelo CALMET necesita para funcionar. También se explican las características de las estaciones meteorológicas de superficie utilizadas. En el último subcapítulo se profundiza en los métodos para obtener la isla de calor.

#### 3.1.1 Imágenes Landsat 8

Dentro de la amplia gama de sensores remotos que observan a la Tierra, Landsat es uno de los que actualmente tiene gran diversidad de aplicaciones debido principalmente a la disponibilidad de los productos de manera gratuita y a su completa cobertura global desde la década de los 70's. En cuanto a su resolución espacial, ha ido mejorando conforme las misiones son lanzadas, es decir, Landsat 8 es la que cuenta con una resolución más fina (para más información véase <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat> ).

Para este trabajo se optó por utilizar Landsat 8 *Operational Land Imager* (OLI por sus siglas en inglés) y el *Thermal infrared sensor* (TIRS por sus siglas en inglés) que tiene un tiempo de revisita de 16 días y que ha tomado imágenes de la Tierra desde el año 2013 (USGS, 2019).

A diferencia de otros sensores que únicamente recogen la señal en la región visible e infrarrojo cercano con una resolución espacial aceptable, Landsat 8 también lo hace en la región térmica y la divide en dos bandas que van de los 10.60 a 11.19  $\mu\text{m}$  para la banda 10 y de 11.50 a 12.51  $\mu\text{m}$  para la banda 11 a una resolución

espacial de 100 m (USGS, 2018), que es un poco más gruesa que las regiones visibles e infrarroja (30 m), pero que es admisible para derivar la temperatura superficial terrestre.

En cuanto a la selección de los días a utilizar, se tomó en cuenta la cantidad de nubes presentes debido a que éstas funcionan como una barrera ya que no permiten que el sensor recoja la energía irradiada desde la superficie, y hasta ahora no hay ningún proceso que pueda recuperar esa información. Dicho lo anterior, el criterio fue que éstas tuvieran menos del 10% de nubosidad.

Se logró encontrar una imagen para cada estación del año para los años 2013 (año estándar) y 2015 (año El Niño) con la finalidad de caracterizar la ICU estacional en dos situaciones climáticas distintas. Sin embargo, como el sensor comenzó a tomar imágenes a partir de marzo de 2013, no existen imágenes de los primeros meses del año, por lo que se decidió utilizar una de enero de 2014, ya que en la mayor parte del año 2014 no se había presentado ninguna anomalía térmica en el Pacífico ecuatorial que diera indicio de la futura presencia del fenómeno de El Niño (NOAA, 2018).

En cuanto al horario de adquisición de las imágenes, este se puede consultar en los metadatos de las mismas. Cabe resaltar que la hora en la que el sensor pasa por un área determinada del planeta no puede modificarse bajo ninguna circunstancia, ya que así ha sido calibrado desde mucho antes del lanzamiento al espacio. Por lo tanto, para estas escenas, la hora de adquisición fueron las 17:15 UTC aproximadamente, lo que equivale a las 11:15 (horario de invierno) o 12:15 (horario de verano) para la ciudad de Aguascalientes (Tabla 3.1).

**Tabla 3.1 Fechas y horarios de adquisición de imágenes Landsat 8 seleccionadas**

<b>Imágenes</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>
Enero, 2014	4/01/2014	11:19 am
Mayo, 2013	18/05/2013	*12:13 am
Junio, 2013	19/06/2013	*12:13 am

Noviembre, 2013	26/11/2013	11:13 am
Enero, 2015	23/01/2015	11:17 am
Mayo, 2015	23/05/2015	*12:16 am
Julio, 2015	27/06/2015	*12:11 am
Noviembre, 2015	23/11/2015	11:17 am

\*horario de verano. Fuente: elaboración propia con base en los metadatos de imágenes Landsat 8.

### 3.1.2 Estaciones meteorológicas

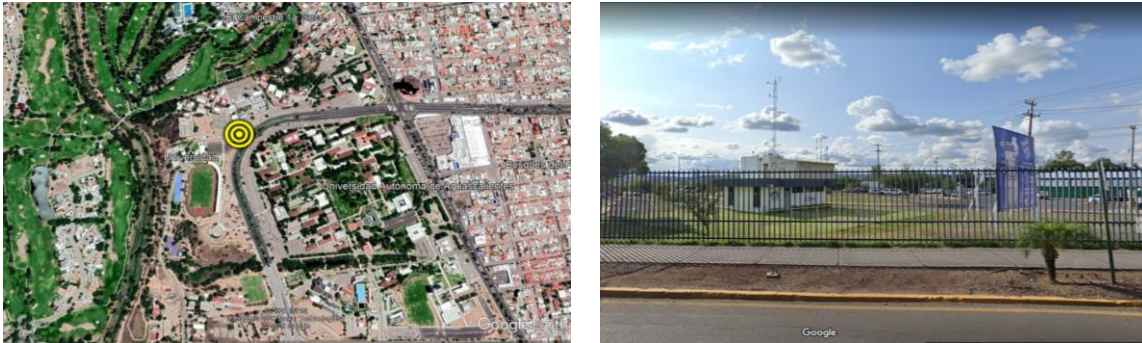
Según la literatura citada en el capítulo anterior, para calcular la ICU atmosférica es necesario contar con datos meteorológicos de sensores *in situ*. Dentro de la ciudad existen únicamente 2 estaciones meteorológicas automáticas que eran susceptibles de ser utilizadas en esta investigación, sin embargo se optó por utilizar únicamente una, que es la que está ubicada en un lugar más urbanizado ya que se encuentra rodeada por edificios y avenidas. Mientras que la selección de la estación rural se realizó aplicando el mismo criterio de localizarse en un ambiente completamente rural y que además se encontrara a una distancia adecuada (alrededor de 10 km del centro de la ciudad de acuerdo con Rasul, et al., 2016).

Así, se solicitó al Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos perteneciente al INIFAP los datos de la Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automáticas de la estación Universidad y San Jacobo para caracterizar el ambiente urbano y el rural, respectivamente. Las variables solicitadas fueron la temperatura del aire, humedad atmosférica, radiación global, dirección y velocidad del viento de forma horaria para los años 2013 (año estándar) y 2015 (año El Niño).

La estación Universidad (21.91565°N, -102.3188333°W) se localiza al nororiente dentro de la ciudad, dentro del campus de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. El uso de suelo por el que está rodeada es mayormente concreto y poca vegetación natural en la cercanía. Los obstáculos que predominan son árboles

y la mayoría de ellos se encuentra a una distancia considerable de los sensores (Figuras 3.1).

**Figuras 3.1 Estación Universidad, Aguascalientes**



Fuente: Google Earth, 2019.

Por su parte, la estación San Jacobo (21.922433°N, -102.375550°W) es una de las estaciones fuera de la ciudad que sobresale por su entorno completamente rural y a la cual se accede únicamente a través de una brecha de tierra. Se encuentra rodeada de vegetación natural y tierras de cultivo, así como un par de casas de lámina a su alrededor (Figuras 3.2). La distancia que existe desde el centro de la ciudad hasta la estación es de aproximadamente 9.3 km.

**Figuras 3.2 Estación San Jacobo, Aguascalientes**



Fuente: Google Earth, 2019.

### 3.1.3 Modelo CALMET

El modelo requiere una serie de insumos que no sólo son meteorológicos, para ser configurado de manera acertada y simular la realidad lo mejor posible.

El primer conjunto de datos son los denominados geofísicos que reúnen a la elevación del terreno y a la cobertura y uso de suelo. CALMET ofrece la opción de utilizar bases de datos ya integradas para este tipo de datos. Así, para el relieve se utilizó la malla de GTOPO30 que tiene una resolución espacial de aproximadamente 1 km, en proyección geográfica y datum WGS84. Mientras que para la cobertura y uso de suelo los datos fueron tomados del *Global Land Cover Characterization* (GLCC por sus siglas en inglés) que a su vez se derivaron del *Advance Very High Resolution Radiometer* (AVHRR por sus siglas en inglés) entre abril de 1992 y marzo de 1993, con resolución espacial de 1 km y con proyección Goode y Lambert Azimutal (Pereyra-Castro, 2017), no obstante para lograr una mejor resolución espacial, la malla se interpoló a 500 m. Conjuntamente, por la antigüedad de la base de datos, así como el crecimiento constante de la ciudad de Aguascalientes, el área sobre la ciudad no estaba señalada correctamente en los píxeles proporcionados por GLCC, por lo que se añadió el tipo de uso de suelo urbano de manera manual con base en un compuesto de NDVI del año 2013 previamente generado.

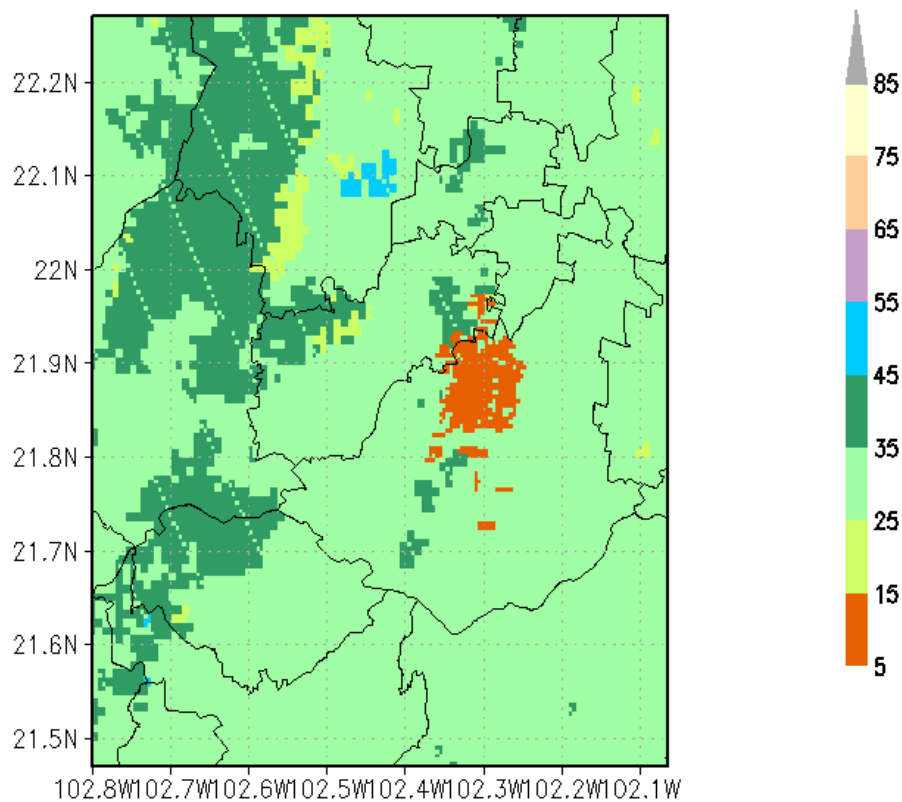
Para los datos meteorológicos, se decidió utilizar los provenientes del *North America Mesoscale Forecast System* (NAM por sus siglas en inglés) para el año 2013. Esto debido a diferentes razones, la primera se debe a la falta de una red densa de estaciones meteorológicas en superficie dentro y en los alrededores de la ciudad que pueda proveer las mediciones necesarias de cada variable meteorológica, mientras que la segunda razón responde a la facilidad con que se acceden a los datos de NAM mediante su página en línea ( <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/north-american-mesoscale-forecast-system-nam> ).

NAM ofrece diferentes resoluciones espaciales producidas por el *Advanced Weather Interactive Processing System* (AWIPS por sus siglas en inglés). Existen dos tipos, la primera tiene 40 km (Malla AWIPS 212) y la segunda tiene 12 km (Malla

AWIPS 218). La resolución vertical es de 25 hPa y genera 39 niveles. Temporalmente, se inicia cuatro veces al día (00, 06, 12 y 18 UTC) y cuenta con una duración del pronóstico de 84 horas (Pereyra-Castro, 2017).

En esta investigación se utilizó la malla AWIPS 218 en intervalos de una hora hasta el tiempo 23 y con 23 niveles en la vertical. Los datos NAM fueron interpolados para obtener una malla con 90x90 puntos espaciados a 5 km para el dominio de estudio (Figura 3.3).

**Figura 3.3 Dominio de estudio y usos de suelo en el modelo CALMET**



\*La mancha urbana se representa en color naranja. Fuente: elaboración propia.

### 3.1.3.1 Configuración de los experimentos

Los experimentos en el modelo CALMET consistieron en modelar todos los días del año 2013, a excepción de los días cuyos datos horarios estaban incompletos.

El primer paso fue convertir los archivos NAM de la extensión .grb2 a .grb para utilizarlos como insumo del primero módulo. Posteriormente dentro del módulo CALETA se establecieron previamente una serie de parámetros con los cuales, una vez que se leyeron los archivos NAM, se cortaron espacial y temporalmente para únicamente analizar el área de estudio y las horas necesarias por día. La información extraída se ingresó al modelo CALMET, donde se resolvieron las ecuaciones que más adelante se describirán. Con el módulo de PRTMET se unificaron todos los archivos resultantes del módulo anterior y a continuación se transformaron a extensiones que el software GrADS pudiera leer.

Una vez que los archivos se revisaron mediante GrADS, se prosiguió a construir los promedios de temperatura por nivel, por hora y sus anomalías correspondientes para cada día del año. Las anomalías se calcularon con la diferencia entre el promedio diario de la temperatura del mes y el promedio de la temperatura del día elegido para todo el dominio.

Por el tamaño de la ciudad, así como por las condiciones propias del clima dentro del dominio simulado, la mayoría de los mapas del año presentaron poca o nula evidencia de islas frías o cálidas sobre la ciudad, por lo que fueron descartadas para su uso en la investigación. Después de revisarlos, se seleccionaron los que cumplieron con el criterio de mostrar diferencias de anomalías de temperatura rural-urbano.

Posteriormente, se construyeron perfiles de la temperatura que mostraban su comportamiento en diferentes alturas de la atmósfera a lo largo del día. Éstos se elaboraron sobre ubicaciones específicas en donde se sabe que los usos de suelo son contrastantes, por ejemplo:

- a) La estación meteorológica automatizada rural “San Jacobo”
- b) El centro del campo de golf del residencial “Pulgas Panda”
- c) La estación meteorológica automatizada urbana “Universidad”
- d) El centro geográfico de la ciudad que está conformado por la Plaza Patria



Los días seleccionados fueron los que previamente ya se habían elegido como posibles fechas con islas urbanas. De estos perfiles únicamente se usaron en la tesis los más representativos por estación del año.

### 3.2 Método

En este apartado se describen los procesos seguidos para alcanzar los resultados que demuestren la presencia y comportamiento de la ICU en la ciudad de Aguascalientes.

#### 3.2.1 Derivación de las temperaturas de superficie de brillo

El procedimiento para obtener la TS consiste en una serie de pasos descritos a continuación. En primer lugar, es necesario llevar a cabo una corrección radiométrica para obtener las temperaturas de brillo con la función de Planck invertida (Dash, et al., 2002; Weng, 2009), así como obtener la reflectancia de las bandas visible e infrarrojo cercano. Después, debido a que los sensores captan la radiancia en el tope de la atmósfera (*Top Of The Atmosphere* TOA por sus siglas en inglés), y ésta es resultado de la mezcla de tres factores de energía: a) radiancia emitida desde la superficie terrestre, b) ascendencia de la radiancia desde la atmósfera y c) descendencia de la radiancia desde el cielo (Weng, 2009), es necesario aplicar una corrección atmosférica. Posteriormente se obtiene la emisividad por tipo de cobertura de suelo y finalmente se calcula la TS con la ecuación propuesta por Barbagallo, et al. (2009).

Para obtener las temperaturas de brillo primero es necesario pasar de Números Digitales (ND) a radiancia en el TOA. De acuerdo con el manual de usuario de USGS (2019), se utiliza la siguiente ecuación:

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

Donde:

- $L_{\lambda}$  = Radiación espectral de TOA ( $\text{Wm}^{-1} \text{srad}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ )

- $M_L$ = Factor de reescalado multiplicativo específico de la banda a partir de los metadatos (RADIANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de la banda)
- $A_L$ = Factor de reescalado aditivo específico de la banda a partir de los metadatos (RADIANCE\_ADD\_BAND\_x, donde x es el número de la banda)
- $Q_{cal}$ = Valores de píxeles de productos estándar cuantificados y calibrados (ND)

Posteriormente se debe obtener la reflectancia en el TOA de todas las bandas, excepto las termaleas, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\rho_{\lambda}' = M_{\rho} Q_{cal} + A_{\rho} \dots \dots \dots \text{Ec. 2}$$

Donde:

- $\rho_{\lambda}'$ = Reflectancia planetaria TOA, sin corrección por ángulo solar. Se debe tener en cuenta que  $\rho_{\lambda}'$  no contiene una corrección para el ángulo del Sol
- $M_{\rho}$ = Factor de reescalado multiplicativo específico de la banda a partir de los metadatos (REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de la banda)
- $A_{\rho}$ = Factor de reescalado aditivo específico de la banda a partir de los metadatos (REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_x, donde x es el número de la banda)
- $Q_{cal}$ = Valores de píxeles de productos estándar cuantificados y calibrados (ND)

Sin embargo es necesario añadir la corrección para el ángulo del Sol para obtener la reflectancia en el TOA verdadera:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\sin(\theta_{SE})} \dots \dots \dots \text{Ec. 3}$$

Donde:

- $\rho_{\lambda}$ = Reflectancia planetaria TOA
- $\theta_{SE}$ = Ángulo de elevación local del Sol. Se proporciona en los metadatos como SUN\_ELEVATION
- $\theta_{SZ}$ = Ángulo cenital solar local;  $\theta_{SZ} = 90^{\circ} - \theta_{SE}$

En cuanto a las bandas térmicas, se obtiene la temperatura de brillo con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \dots\dots\dots \mathbf{Ec. 4}$$

Donde:

- T= Temperatura de brillo de la atmósfera (K)
- $L_\lambda$ = Radiación espectral TOA ( $\text{Wm}^{-1} \text{srad}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ )
- $K_1$ = Constante de conversión térmica específica de banda a partir de los metadatos ( $K1\_CONSTANT\_BAND\_x$ , donde x es el número de banda térmica)
- $K_2$ = Constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos ( $K2\_CONSTANT\_BAND\_x$ , donde x es el número de banda térmica)

### 3.2.2 Derivación de la Emisividad de Superficie

Una vez obtenida la temperatura de brillo, se debe corregir atmosféricamente para eliminar los efectos tales como la absorción, reflexión y dispersión, añadidos por los componentes de ésta.

La corrección que se utilizó fue *Dark Object Subtraction* (DOS por sus siglas en inglés) y que ya viene integrada en el Sistema de Información Geográfica QGIS. Ésta extrae los valores más bajos de reflectancia de la imagen, ya que se asume que son producto de la dispersión atmosférica, después se calibra el resto de la imagen para ser convertidos a temperatura de brillo en superficie (Chavez, 1988).

$$L = \frac{ND - offset}{gain_2} \dots\dots\dots \mathbf{Ec. 5}$$

Donde:

- ND= Números digitales
- offset= compensación
- gain= ganancia

Una vez corregidas las imágenes atmosféricamente, se utiliza el método de estimación de ES a través del uso del NDVI el cual es producto del cociente de dos bandas de la región visible:

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \dots \dots \dots \mathbf{Ec. 6}$$

Donde:

- NDVI= Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
- NIR= Banda infrarrojo cercano. En Landsat 8 es la número 5
- Red= Banda del rojo. En Landsat 8 es la número 4

Cuando se hubo calculado la cantidad de vegetación en la imagen, se procede a determinar la emisividad por tipo de cobertura (Dash, et al., 2002):

$$\varepsilon = a + b * \ln (NDVI) \dots \dots \dots \mathbf{Ec.7}$$

Donde:

- $\varepsilon$ = Emisividad
- a= 1.0094
- b= 0.047

### 3.2.3 Derivación de la Temperatura de Superficie

Una vez calculada la emisividad de superficie, es posible calcular la temperatura de superficie. De acuerdo con Barbagallo, et al. (2009) se requiere como entrada los datos de temperatura de brillo y de emisividad en superficie:

$$T_s = \frac{T_B}{1 + (\lambda * \frac{T_B}{r}) \ln (\varepsilon)} \dots \dots \dots \mathbf{Ec. 8}$$

Donde:

- $T_s$ = Temperatura en superficie
- $T_B$ = Temperatura de brillo
- $\lambda$ = Longitud de onda= 10.8  $\mu$ m

- $r = 1.438 \times 10^{-2}$  que se compone del producto de la constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34}$  J s), de la velocidad de la luz ( $2.998 \times 10^8$  m s<sup>-1</sup>) y de la constante de Boltzman ( $1.38 \times 10^{-23}$  J K<sup>-1</sup>)

### 3.2.4 Cálculo de la intensidad de la Isla de Calor Urbana Superficial

El siguiente paso consta del cálculo de la presencia e intensidad de la ICU mediante la ecuación 9 (Voogt y Oke, 2003; Sobrino, et al., 2013):

$$ICU_s = TST_u - TST_r \dots \dots \dots \text{Ec. 9}$$

Donde:

- ICU<sub>s</sub>= Intensidad de la Isla de Calor Urbana superficial
- TST<sub>u</sub>= Temperatura superficial terrestre urbana
- TST<sub>r</sub>= Temperatura superficial terrestre rural

El punto de referencia que se utiliza como representativo del área rural es la estación San Jacobo debido a que se conoce la localización exacta, así como el uso de suelo a sus alrededores, por lo que es posible aseverar que se ubica en un ambiente completamente rural.

Una vez realizada la sustracción de valores a los ráster en el software QGIS, los valores obtenidos pueden rondar entre positivos (ICU) y negativos (IFU).

### 3.2.5 Cálculo de la Isla de Calor Urbana atmosférica

Para este paso fue necesario ordenar la base de datos proporcionada por el INIFAP. Posteriormente se promedia la temperatura horaria para cada mes y se elaboran gráficas de la variación diurna (7:00 a 17:00h) y nocturna (18:00 a 6:00h) a lo largo de los meses de los años 2013 y 2015.

Además, para conocer el ciclo diario de la temperatura del aire estacionalmente, se calcularon los promedios de los datos horarios a lo largo de 4 meses contrastantes por año y posteriormente se grafican los resultados.

De manera complementaria a las imágenes satelitales, se graficaron las temperaturas diurnas de los días del paso del satélite sobre la ciudad.

### 3.2.6 Obtención de la Isla de Calor Urbana tridimensional

El modelo CALMET sigue una serie de pasos para poder calcular las temperaturas en un plano tridimensional. Para su cálculo sobre la superficie se utiliza el método de balance de energía basado en Holtslag y van Ulden (1983). Los principales parámetros que se necesitan para describir la estructura de la capa de mezcla son el flujo superficial de calor ( $Q_h$ ), flujo del momento superficial ( $\rho u^2$ ) y la altura de la capa de mezcla ( $h$ ). Otros parámetros adicionales como la velocidad de fricción ( $u^*$ ), escala de velocidad convectiva ( $w^*$ ) y el largo de Monin-Obukhov, que se derivan de los anteriores. A continuación se presentan las principales ecuaciones que en las corridas del modelo se resuelven (Scire, et al., 2000).

Para comenzar, el balance de energía en la superficie es descrito por la ecuación 10:

$$Q_* + Q_f = Q_h + Q_e + Q_g \dots \dots \dots \text{Ec. 10}$$

Donde:

- $Q_*$  = radiación neta ( $W/m^2$ )
- $Q_f$  = flujo de calor antropogénico ( $W/m^2$ )
- $Q_h$  = flujo de calor sensible ( $W/m^2$ )
- $Q_e$  = flujo de calor latente ( $W/m^2$ )
- $Q_g$  = flujo de calor almacenado en el suelo ( $W/m^2$ )

Para calcular la radiación neta a través del método de Holtslag y van Ulden (1983) se aplican las ecuaciones 11 y 12:

$$Q_* = \frac{(1-A)Q_{sw} + c_1 T^6 - \sigma T^4 + c_2 N}{1 + c_3} \dots \text{Ec. 11}$$

$$Q_{sw} = (a_1 \sin \varphi + a_2)(1 + b_1 N^{b_2}) \dots \text{Ec. 12}$$

Donde:

- T= temperatura del aire (K)
- $\sigma$ = constante de Stefan-Boltzman ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ )
- N= fracción del cielo cubierta por nubes
- $\varphi$ = ángulo de elevación solar (°)
- $Q_{sw}$ = radiación de onda corta incidente
- A= albedo

Las constantes  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  y  $b_2$  están dadas por Holtslag y van Ulden (1983) y se muestran a continuación (Tabla 3.2):

**Tabla 3.2 Constantes propuestas por Holtslag y van Ulden (1983)**

Constante	Valor
$c_1$	$5.31 \times 10^{-13} \text{ W/m}^2/\text{k}^6$
$c_2$	$60 \text{ W/m}^2$
$c_3$	0.12
$a_1$	$990 \text{ W/m}^2$
$a_2$	$-30 \text{ W/m}^2$
$b_1$	-0.75
$b_2$	3.4

Fuente: elaboración propia con base en Scire, et al. (2000).

Posteriormente, es posible calcular el flujo de calor sensible de día mediante las cantidades conocidas:

$$Q_h = \frac{B}{1+B} [Q_* (1 - c_g) + Q_f] \dots \text{Ec. 13}$$

Donde:

- B= razón de Bowen
- $c_g$ = función de las propiedades de la superficie. De acuerdo con Oke, 1982 (en Scire, et al., 2000), para las áreas rurales se sugiere un valor de 0.05-0.25 y en áreas rurales de 0.25-0.30

Ya que se obtiene el flujo de calor sensible, se procede a calcular la longitud de Monin-Obukhov y la velocidad de fricción de superficie a través de iteraciones:

$$u_* = ku / [\ln \left( \frac{z}{z_0} \right) - \psi_m \left( \frac{z}{L} \right) + \psi_m \left( \frac{z_0}{L} \right)] \dots \text{Ec.14}$$

Donde:

- $z_0$ = largo de rugosidad de la superficie
- $\psi_m$ = función de corrección de estabilidad
- k= constante de von Karman (0.4)
- u= velocidad del viento (m/s) en la altura z

La longitud de Monin-Obukhov está dada por:

$$L = \frac{-\rho c_p T u_*^3}{kg Q_h} \dots \text{Ec.15}$$

Donde:

- T= temperatura (K)
- $c_p$ = calor específico del aire a presión constantes (996 m<sup>2</sup>/(s<sup>2</sup>K))
- $\rho$ = densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)
- g= aceleración debida a la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

La ecuación 14 se usa para obtener una primera estimación de  $u_*$ , asumiendo condiciones neutrales ( $L=\infty$ ). A continuación se sustituye este valor de  $u_*$  en la ecuación 15 para obtener L. Cuando se obtiene el nuevo valor de  $u_*$ , se sustituye en la ecuación 14 junto con el valor nuevo de L. El proceso se repite hasta que se obtenga la convergencia, no obstante Holtslag y van Ulden (1983) mencionan que con tres iteraciones es generalmente suficiente.



Durante las condiciones estables, Weil y Brower (1983 en Scire, et al., 2000) calcularon  $u^*$  con el método basado en Venkatram (1980a):

$$u_* = \frac{C_{DN}u}{2} [1 + C^{1/2}] \dots \text{Ec. 16}$$

$$C = 1 - \frac{4u_0^2}{C_{DN}u^2} \quad (C \geq 0) \dots \text{Ec. 17}$$

$$u_0^2 = \frac{\gamma z_m g \theta_*}{T} \dots \text{Ec. 18}$$

Donde:

- $C_{DN}$  = coeficiente de arrastre neutral [ $k/\ln(z_m/z_0)$ ]
- $\gamma$  = constante (4.7)
- $z_m$  = medida de la altura (m) de la velocidad del viento ( $u$ )

La escala de temperatura  $\theta^*$  se calcula como el mínimo estimado entre dos valores:

$$\theta_* = \min [\theta_{*1}, \theta_{*2}] \dots \text{Ec. 19}$$

La estimación de  $\theta^*$  se basa en Holtslag y van Ulden (1982):

$$\theta_{*1} = 0.09(1 - 0.5N^2) \dots \text{Ec. 20}$$

$$\theta_{*2} = \frac{TC_{DN}u^2}{4\gamma z_m g} \dots \text{Ec. 21}$$

El flujo de calor está relacionado con  $u^*$  y  $\theta^*$  en la ecuación:

$$Q_h = -\rho c_p u_* \theta_* \dots \text{Ec. 22}$$

Para el cálculo la altura de la capa de mezcla se emplea el método de Carson (1973) modificado por Maul (1980 en Scire, et al., 2000). Una vez que se conoce la variación horaria del flujo de calor superficial (Ec. 22), se realiza la estimación del espesor de la mezcla en el instante  $t + dt$  a partir del valor previo en el instante  $t$  por:

$$h_{t+dt} = \left[ h_t^2 + \frac{2Q_h(1+E)dt}{\psi_1 \rho c_p} - \frac{2d\theta_t h_t}{\psi_1} \right]^{1/2} + \frac{d\theta_{t+dt}}{\psi_1} \dots \text{Ec. 23}$$

$$d\theta_{t+dt} = \left[ \frac{2\psi_1 E Q_h dt}{\rho c_p} \right]^{1/2} \dots \text{Ec. 24}$$

Donde:

- $\psi_1$  = tasa de la temperatura potencial en la capa superior  $h_v$
- $d\theta$  = salto de temperatura en el tope de la capa de mezcla (K)
- E = constante (0.15)

La altura de la capa límite neutral se obtiene por el método propuesto por Venkatram (1980b en Scire, et al., 2000):

$$h = \frac{Bu_*}{[fN_B]^{1/2}} \dots \text{Ec. 25}$$

Donde:

- f = parámetro de Coriolis ( $10^{-4}\text{s}^{-1}$ )
- B = constante ( $2^{1/2}$ )
- $N_B$  = frecuencia de Brunt-Väisälä en la capa estable en alto

También Venkatram (1980a en Scire, et al., 2000), propone una ecuación para calcular la altura de mezcla estable:

$$h_1 = B_2 u_*^{3/2} \dots \text{Ec. 26}$$

Donde:

- $B_2$  = constante (2400)

La altura de la capa límite estable se obtiene por el método de Zilitinkevich (1972 en Scire, et al., 2000):

$$h_2 = 0.4 \sqrt{\frac{u_* L}{f}} \dots \text{Ec. 27}$$

CALMET define entonces la altura de la capa límite estable como el mínimo de  $h_1$  y  $h_2$ .

Finalmente, una vez que se ha calculado los parámetros anteriores, se procede a simular los campos de temperatura en las 3 dimensiones. Para ello se requiere de los datos de la temperatura del aire, así como de la profundidad de mezcla convectiva local determinada a partir del método de balance de energía (Scire, et

al., 2000: Hernández-Garces, et al., 2017). Las temperaturas entonces resultarán de la interpolación lineal espacial en la vertical de los datos de temperatura del aire disponibles, así como de una segunda interpolación lineal temporal para cada nivel en la vertical por hora. Asimismo, si se cuentan con datos de radiosondeos, de boyas o de estaciones en superficie, aquí es donde se incorporan.

## Capítulo 4. Resultados y conclusiones

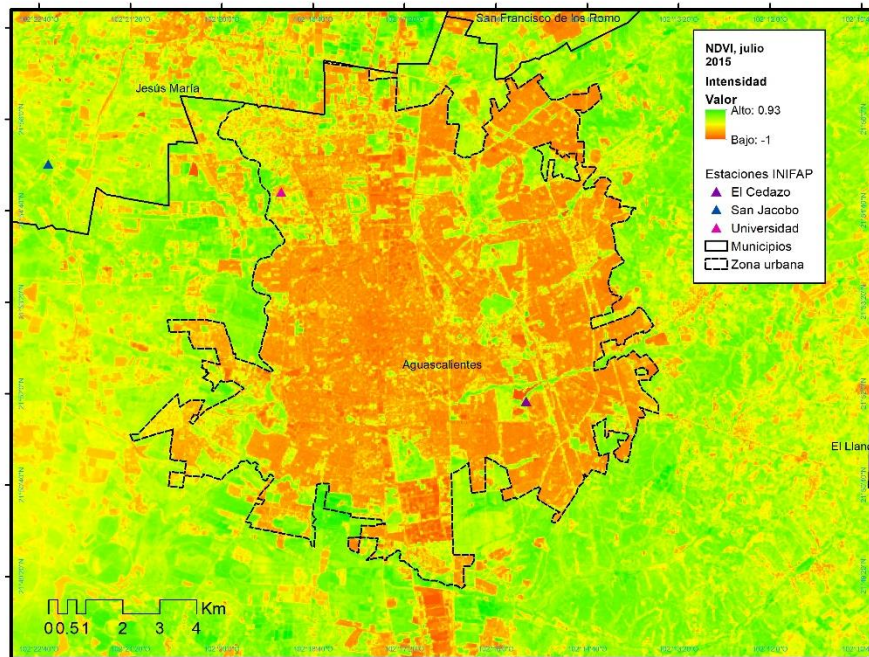
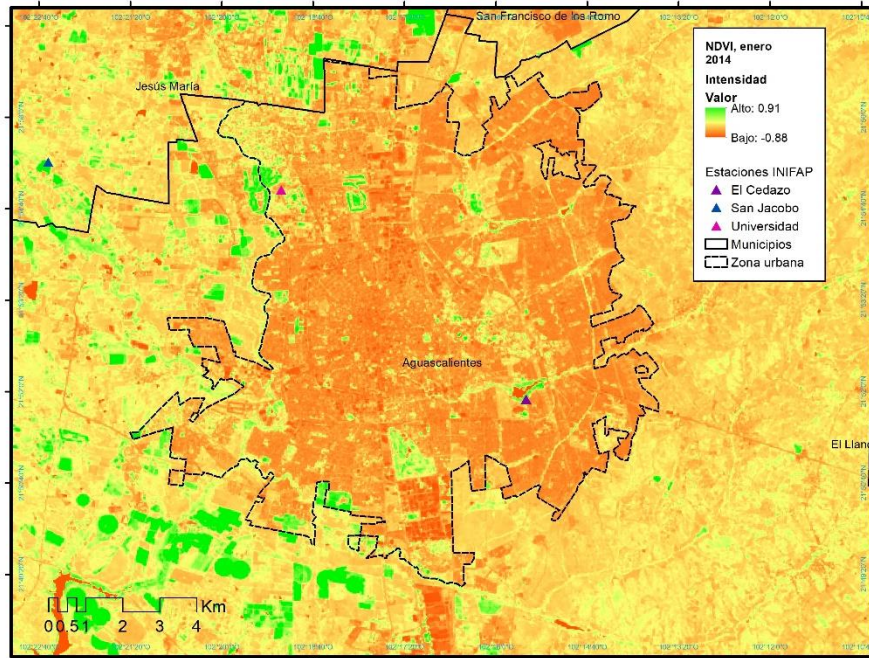
En este capítulo se muestran los resultados de la presencia de la isla de calor en la ciudad de Aguascalientes en los años 2013 y 2015. En primera instancia se encuentran los mapas procedentes de las imágenes de satélite que revelan la existencia de islas de calor e islas frías sobre la ciudad en distintas estaciones del año. Además se muestra la variación de la temperatura del aire dentro y fuera de la ciudad con el uso de información meteorológica de las estaciones de superficie. También se presentan los mapas y perfiles de la atmósfera producto de la simulación de las temperaturas a través del modelo CALMET. Finalmente están la discusión y las conclusiones del trabajo.

### 4.1 Isla de Calor Urbana Superficial

Este apartado presenta la estimación de la isla de calor mediante imágenes Landsat. Como se ha mencionado desde la metodología, las características propias del sensor y de las escenas captadas condicionaron la selección de las imágenes utilizadas, por lo que estos mapas sirven únicamente para ejemplificar y destacar los contrastes de temperatura superficial ligados a la diversidad de coberturas de suelo dentro y fuera de la ciudad.

Antes de comenzar, se exponen dos mapas de NDVI para el periodo seco y para el periodo húmedo del año 2014 y 2015 (Figuras 4.1a y b) con el objetivo de identificar con mayor precisión los distintos grados de cobertura vegetal, que a su vez también funcionan como un indicador de los tipos de cobertura del suelo en todo el dominio espacial presentado. El índice va de +1 a -1 en donde las áreas con valor positivo muestran diferentes grados de cobertura vegetal y entre más cercano a +1 se hace referencia a una cobertura vegetal densa y con buen estado de salud. Los valores bajos cercanos a 0 muestran poca o nula vegetación, es decir suelo desnudo o en su defecto, áreas asfaltadas. Por último, los valores negativos y cercanos a -1 indican la presencia de nieve o agua.

Figuras 4.1 NDVI (a) enero 2014 y (b) julio 2015



Fuente: elaboración propia con base en imágenes Landsat 8.

En los mapas se observó que existieron pocas áreas verdes de tamaño considerable (que no rebasan el km de longitud) dentro de la ciudad, las más importantes fueron las zonas residenciales ubicadas en el noroeste de las que más adelante se hablará, así como el Parque México y Parque Rodolfo Landeros Gallegos. Hacia las afueras de la ciudad, principalmente en la zona suroeste se presentaron diversas áreas con valores muy altos de NDVI debido a que son áreas de cultivo de riego. Los valores cercanos a 0 se pudieron observar por toda la ciudad, especialmente hubo homogeneidad en el patrón NDVI hacia el oriente de la ciudad, donde predomina el uso de suelo habitacional con casas de interés social con poca vegetación alrededor. En la zona occidental de la ciudad existe una mezcla de coberturas de suelo que no permitió definir un patrón específico, a excepción de las áreas verdes en el norte ya descritas.

Al observar y comparar ambas imágenes del periodo seco y húmedo, se reconoció que presentan valores diferentes, debido a que julio es el mes con mayor precipitación, mientras que enero no es el mes más seco, pero sí forma parte de los meses con escasa precipitación. Los contrastes más sobresalientes se ubicaron a las afueras de la ciudad, principalmente en el oriente donde abundan las áreas de cultivo y matorral xerófilo; aquí hubo un índice más elevado en la época de lluvias en comparación con la época de secas.

Dentro de la ciudad, los valores fueron similares en ambas escenas, inclusive en las áreas residenciales con vegetación densa, debido a que éstas mantienen valores constantes a lo largo del año porque son permanentemente irrigadas.

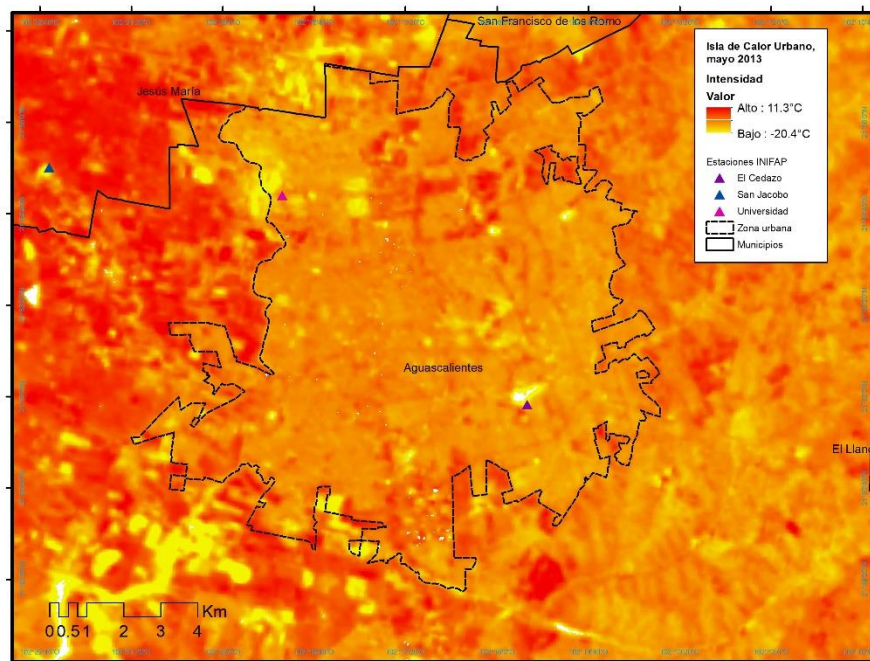
Lo anterior muestra que las áreas más verdes en los distintos meses del año y en las coberturas de suelo actúan como un indicador indirecto de la cantidad de agua disponible para evaporar y, por consiguiente, para absorber calor del ambiente.

En cuanto a la temperatura superficial se refiere, el par de imágenes que se seleccionaron para los meses de mayo (Figuras 4.2a y b) mostraron que el área rural del occidente de la ciudad donde se sitúa la estación San Jacobo presentó temperaturas superficiales entre los 37° y 40°C, en contraste con temperaturas más

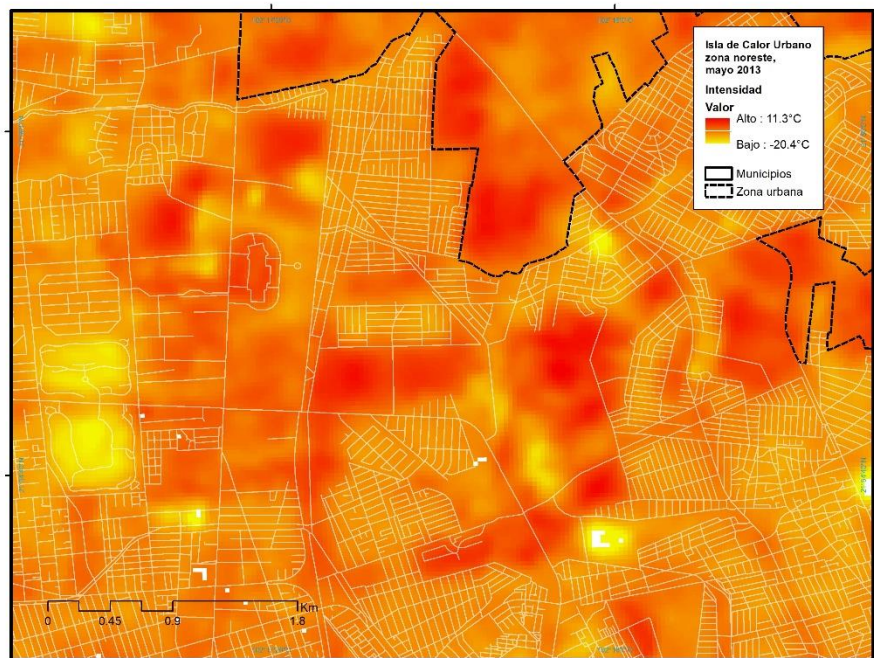
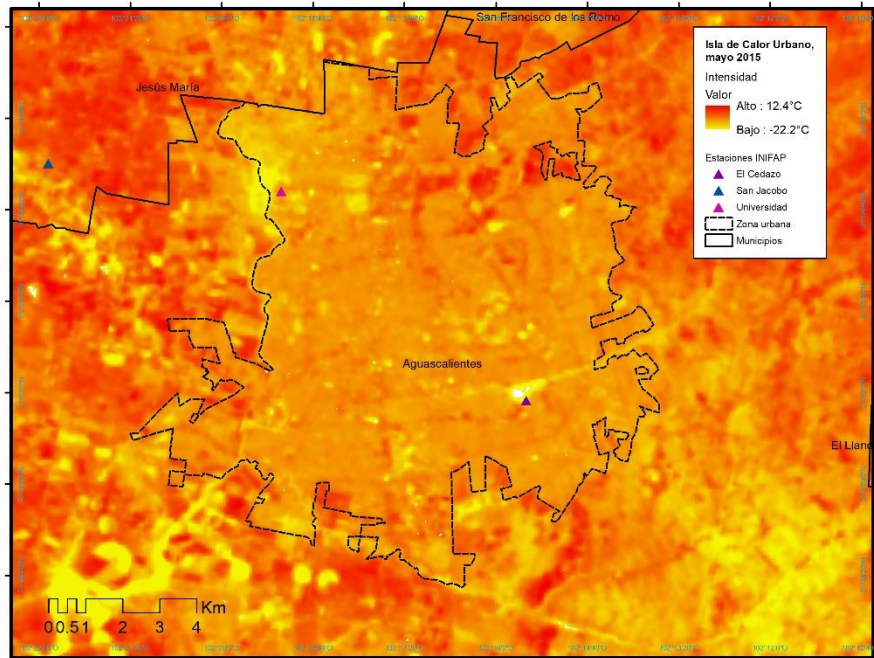
frescas en diferentes partes de la ciudad, originando intensidades negativas que dieron lugar a IFUs.

En el interior de la ciudad, para los dos años de estudio la distribución de la TS fue la misma ya que las diferencias positivas más altas se ubicaron hacia el noreste de la ciudad sobre el centro comercial más importante de la ciudad (+4°C), así como en el Parque México (+6°C), el conglomerado de tiendas de venta de autos como *Mazda*, *Toyota*, *Chevrolet*, *Volvo* y las cementeras *Cruz Azul* y *Calidra* (Figura 4.2c). Mientras que las zonas más frescas se localizaron en el noroeste en los residenciales Club Campestre (-6°C) y Pulgas Pandas (-5°C) y en el campus de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (-3.5°C) (Figura 4.2d). Los parques urbanos tuvieron un comportamiento peculiar, ya que aunque son considerados como áreas verdes, mostraron intensidades negativas más bajas (aproximadamente -3°C) que no fueron tan marcadas ni en extensión ni en intensidad como en las áreas residenciales descritas antes.

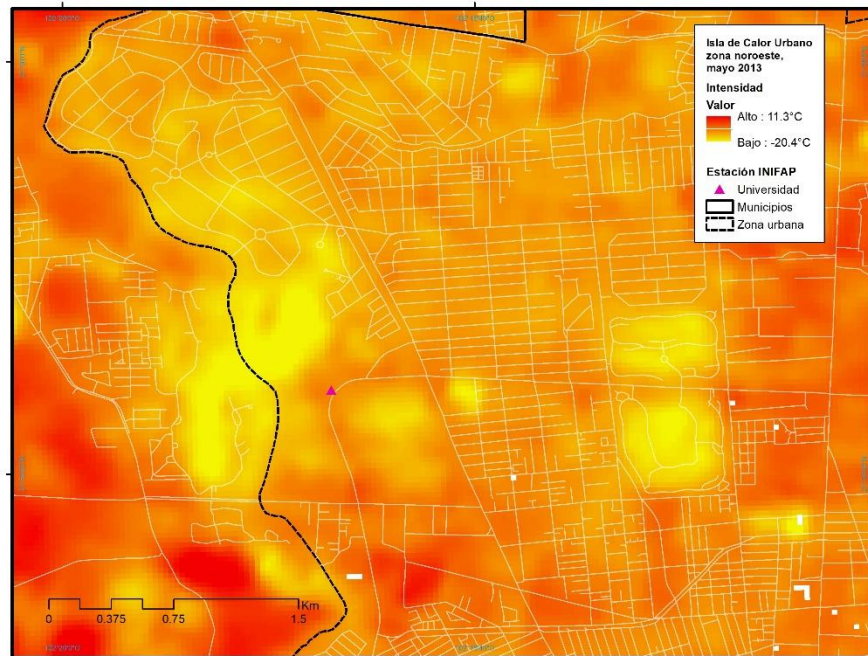
**Figuras 4.2a-d Isla de Calor Urbana Superficial mayo, 2013 y 2015**







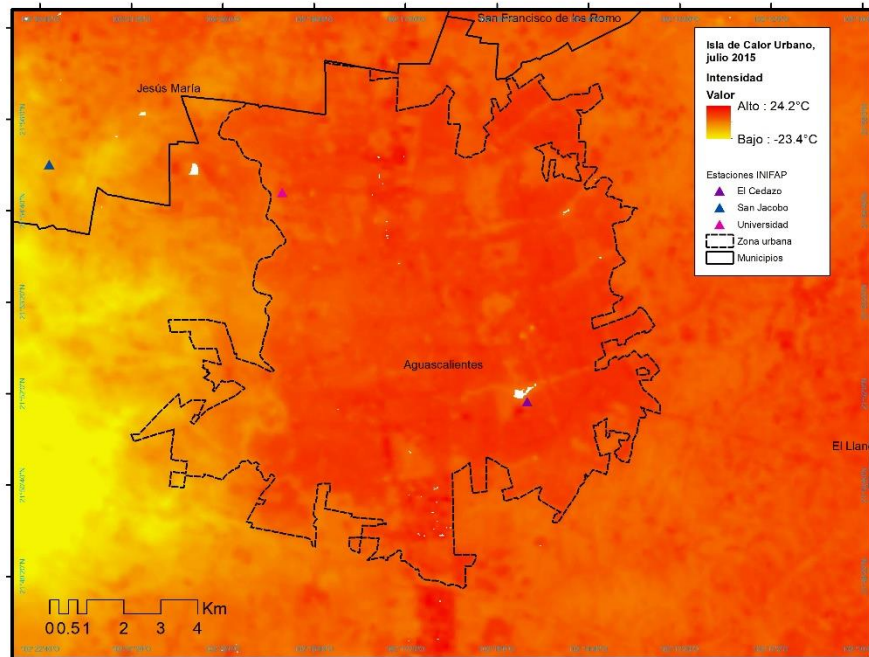
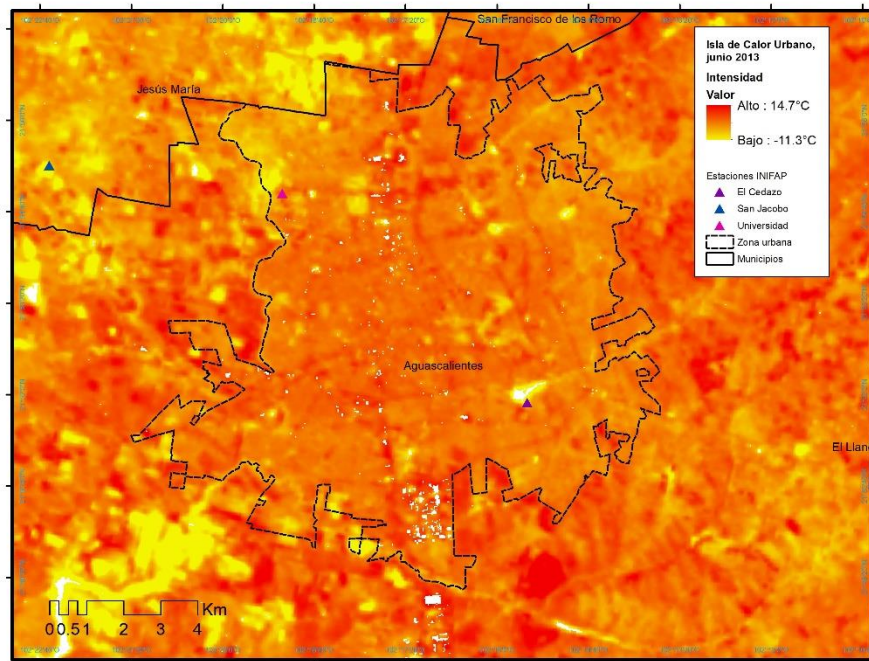




Fuente: elaboración propia con base en imágenes Landsat 8.

Hacia los meses del verano, las imágenes elegidas revelaron, por un lado que en 2013 los contrastes de TS urbano-rural fueron menores que en primavera y mostraron una ICU menos intensa que se disipó en los límites del norte y del sur de la ciudad, sin embargo ésta se comportó de manera similar a las imágenes anteriores, en donde el noreste se ubicaron las diferencias más elevadas (aproximadamente  $+9^{\circ}\text{C}$ ) y en el noroeste en las áreas con mayor vegetación las diferencias fueron cercanas a los  $0^{\circ}\text{C}$  (entre  $-1$  y  $+1^{\circ}\text{C}$ ) debido a que la presencia de vegetación abundante y del aporte de agua por las lluvias, provocó que la temperatura superficial descendiera. Por otro lado, la estimación de la TS para el año 2015 en el mes de junio no fue posible debido a la cobertura nubosa que invadía gran parte de la ciudad en todas las escenas disponibles, por lo que se decidió utilizar una imagen con la menor nubosidad posible y la única acorde fue en el mes de julio, sin embargo hacia el oeste de la ciudad hubo una nube que alteró la recuperación adecuada de la TS, arrojando así una temperatura rural de  $16.2^{\circ}\text{C}$ , en consecuencia la intensidad al interior de la ciudad fue mayormente positiva (de más de  $10^{\circ}\text{C}$  que se debe tomar con reserva) (Figuras 4.3a y b).

Figuras 4.3 Isla de Calor Urbana Superficial (a) junio y (b) julio, 2013 y 2015



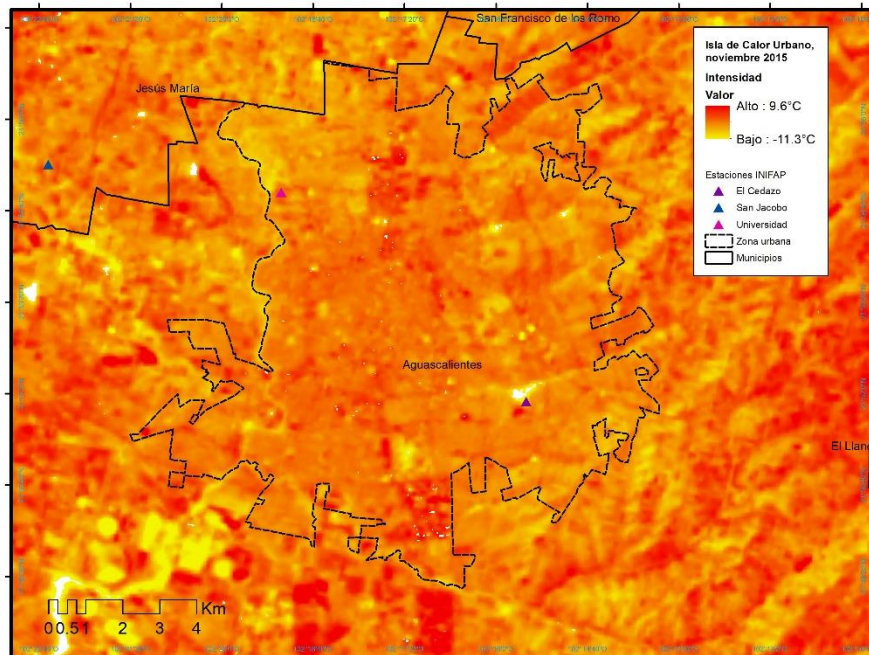
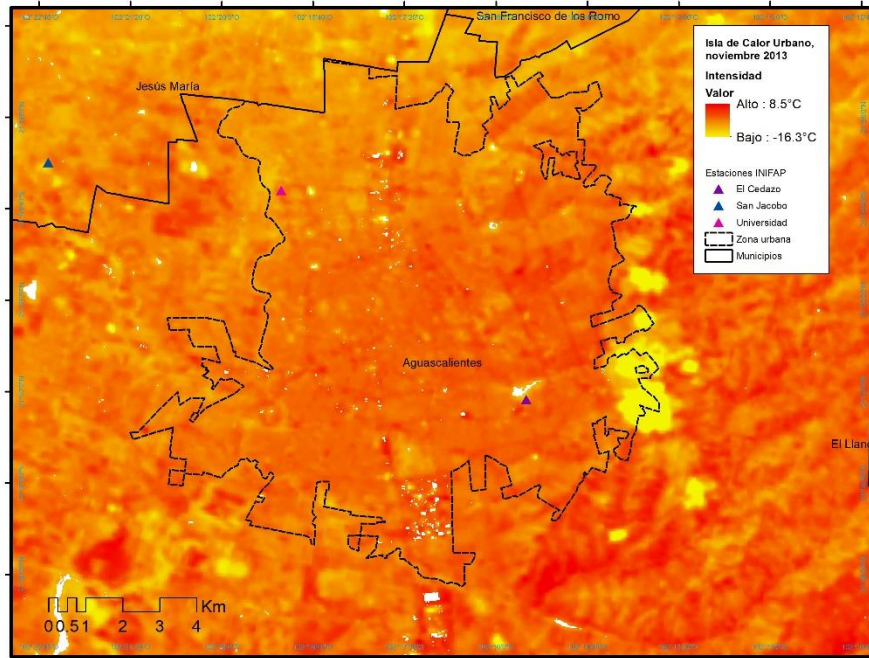
Fuente: elaboración propia con base en imágenes Landsat 8.

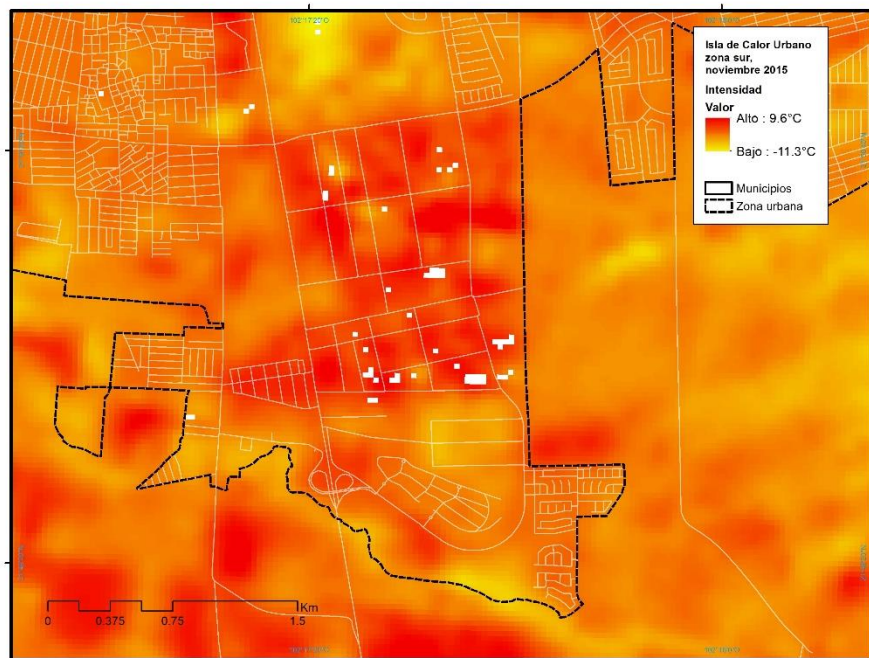
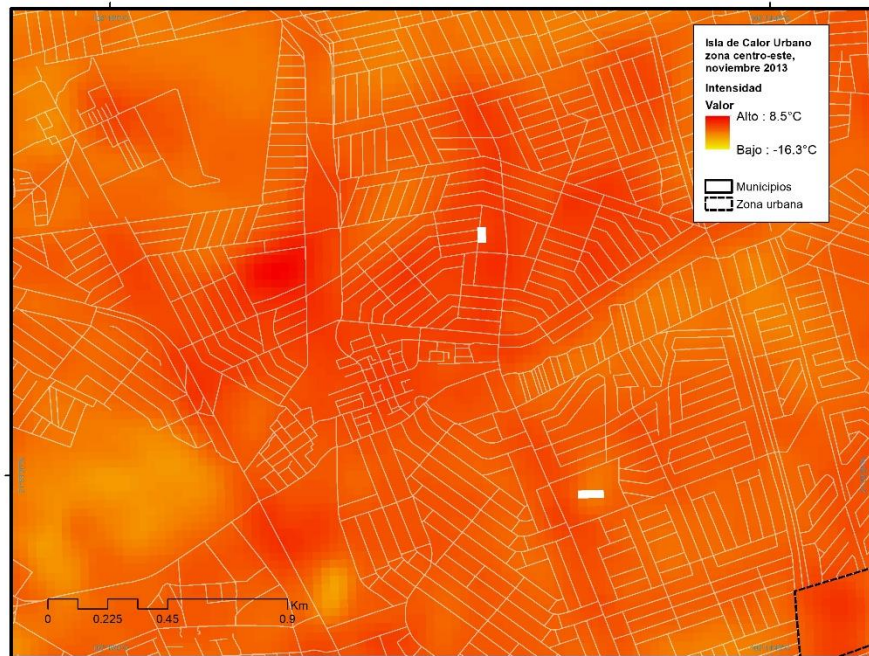
A diferencia de los mapas anteriores, en el mes de noviembre las TS fueron similares entre la ciudad y sus alrededores, dando como resultado imágenes más homogéneas que se asocian a temperaturas más frescas en este mes, generando una menor retención de calor al interior de la ciudad y, por consiguiente, diferencias menores (Figuras 4.4a y b). Dentro de la ciudad, los patrones que se repitieron en las imágenes anteriores sufrieron ligeras modificaciones, ya que, además del área comercial en el noreste de la ciudad (entre +3 y +4°C), resaltó la colonia Fidel Velázquez con intensidades entre +3 y +5°C (Figura 4.4c). Los parques urbanos no fueron tan frescos como en otras épocas del año ya que presentaron diferencias de aproximadamente -1°C. Cabe destacar también que las zonas residenciales del noroeste fueron ligeramente frescas, mucho menos que en meses anteriores.

La imagen del año 2015 mostró que fue un día mucho más cálido que en el 2013. En esta imagen también se evidenció un cambio en el comportamiento de la TS dentro de la ciudad, por lo que las áreas más cálidas se localizaron en el centro oriente; áreas como el Complejo Tres Centurias (+4°C) o la Ciudad Industrial al sur (entre +3 y +6°C) (Figura 4.4d) se le sumaron a la zona comercial del noroeste como las áreas más cálidas en esta temporada. Mientras que las áreas más frescas fueron nuevamente las residenciales (entre 0 y -2°C), aunque no fueron tan frescas como sí en mayo.



Figuras 4.4a-d Isla de Calor Urbana Superficial noviembre, 2013 y 2015





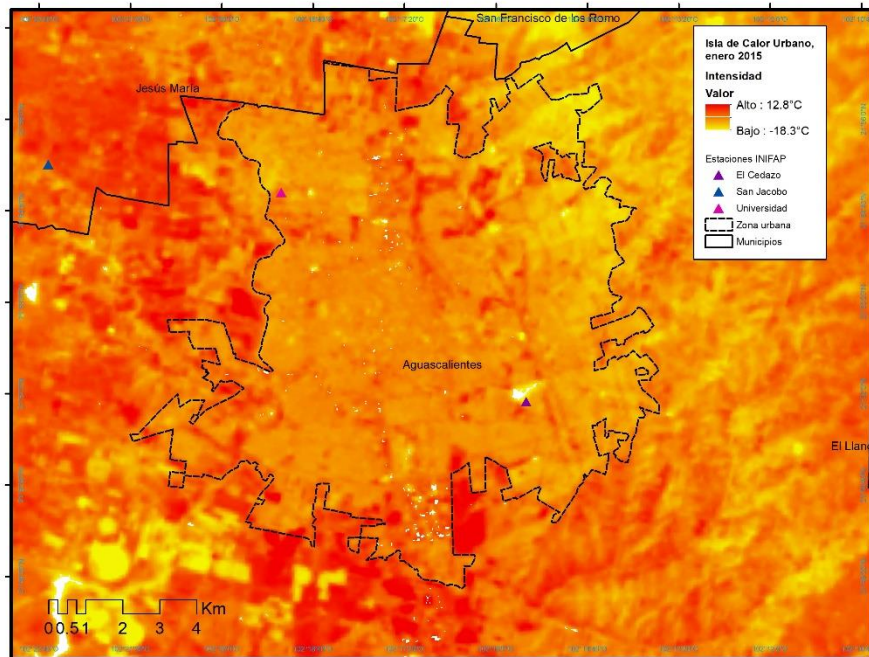
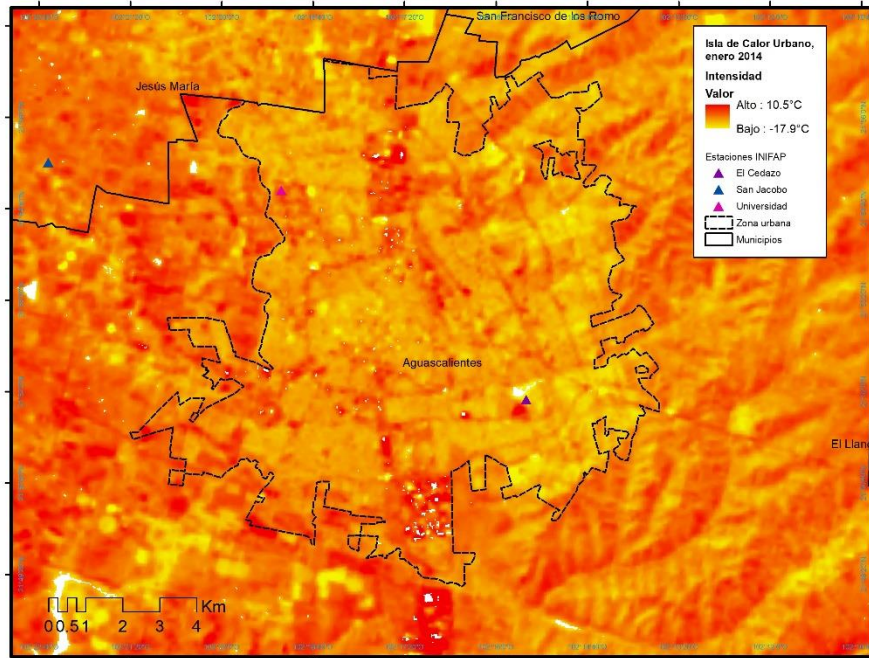
Fuente: elaboración propia con base en imágenes Landsat 8.

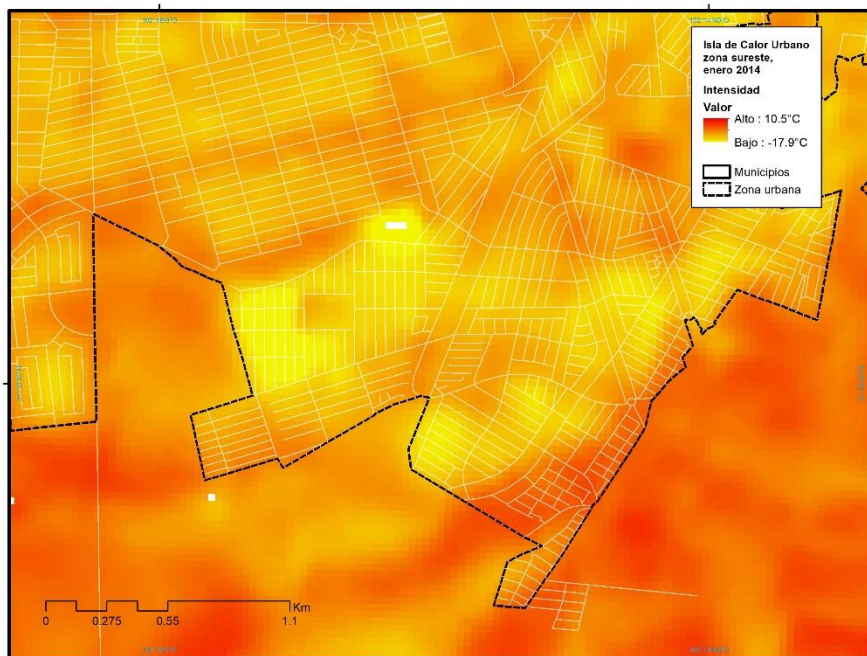
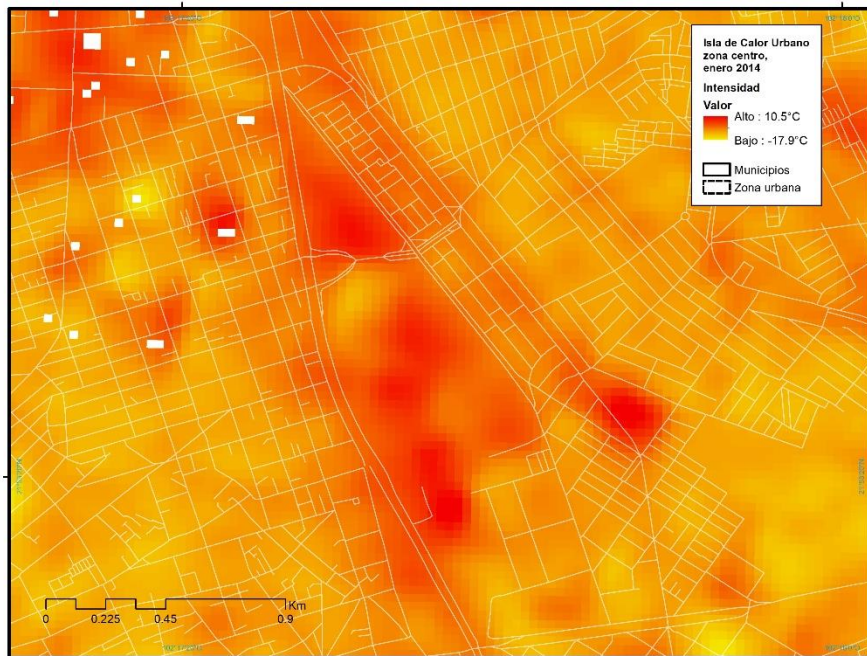
Finalmente, para invierno se eligieron dos imágenes en los meses de enero (Figuras 4.5a y b). En el año 2014 la distribución de la TS fue ligeramente similar a noviembre, sin embargo en este día resaltaron por su intensidad elevada las avenidas del oriente de la ciudad, el Complejo Tres Centurias, el Museo Espacio y el Hospital Miguel Hidalgo (hasta  $+4^{\circ}\text{C}$ ) (Figura 4.5c) además de los centros comerciales Altaria y Galerías que a lo largo del año siempre se presentaron como más cálidos (entre  $+4$  y  $+6^{\circ}\text{C}$ ). Contrario a los meses anteriores, las áreas más frías estuvieron en las zonas habitacionales hacia el sureste y este en colonias como Lomas de Vistabella y Lomas de Ajedrez ( $-0.5$  a  $+1^{\circ}\text{C}$ ) (Figura 4.5d).

En el año 2015 se presentaron intensidades altas en las afueras de la ciudad hacia el noroeste y sur, fenómeno que no se observó en los mapas representativos de otoño e invierno del año 2013. El patrón de la TS intraurbana fue más parecido a los meses cálidos del año, por lo que en el noreste sobre las áreas comerciales y las cementeras fueron las más cálidas (entre  $+2$  y  $+4^{\circ}\text{C}$ ). Por el contrario, las áreas más frías estuvieron en los residenciales mencionadas arriba, sin embargo en este mes se perciben con mayor dificultad debido a que las diferencias de intensidad son menores con respecto a sus alrededores. Las temperaturas en estos espacios van entre los  $-4$  y  $-3^{\circ}\text{C}$  aproximadamente. Otras zonas que considerar en este rubro son las colonias del noreste (Villas de Nuestra Señora de la Asunción y Fraccionamiento Natura), justo en los límites de la ciudad, ya que a diferencia de las otras imágenes, aquí sobresalieron con  $-5^{\circ}\text{C}$  aproximadamente (Figura 4.5e).

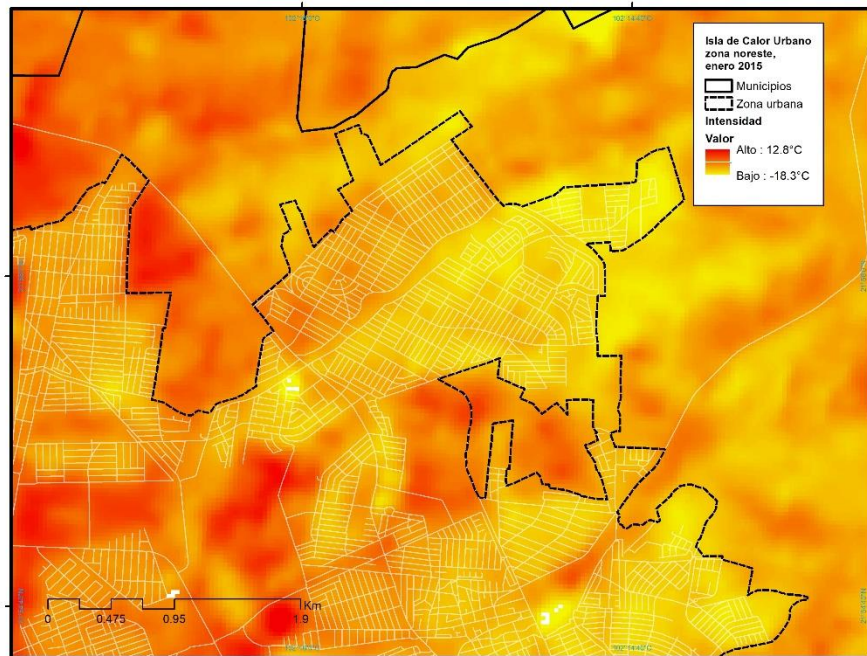


Figuras 4.5a-e Isla de Calor Urbana Superficial enero, 2014 y 2015









Fuente: elaboración propia con base en imágenes Landsat 8.

Con lo anteriormente explicado se precisa que estacionalmente las mayores TS ocurrieron en primavera y verano. Sin embargo, en el área rural localizada al oeste de la ciudad fue donde hubo la TS ligeramente mayor provocando que al calcular la intensidad de la isla superficial en estos meses, la ciudad mostrara valores negativos que dieron lugar a la IFUs. Este hallazgo es congruente con otras investigaciones realizadas en ciudades con climas áridos y semiáridos en donde es común que el patrón rural-frío y urbano-cálido no se cumpla siempre y en su lugar, la ciudad sea más fría que los ambientes circundantes debido a la sinergia de dos factores: por un lado, la vegetación natural que domina el paisaje rural (especialmente hacia el este y oeste) permanece seca, por lo que se encuentra limitada para llevar a cabo el proceso de evaporación (enfriar), generando así que las temperaturas sean mayores cuando se comparan con la ciudad (Rasul, et al., 2016). Por otro lado, los jardines, parques urbanos y campos de golf que están permanentemente regados dentro de la ciudad sí poseen esta capacidad de enfriamiento de las temperaturas superficiales, y consecuentemente del aire, ya que la vegetación dispone de agua para evaporar y transpirar (Alavipanah, et al., 2015).

En el otoño e invierno de ambos años de estudio la distribución de la TS fue distinta en comparación con la primera mitad del año ya que, de manera general, la ciudad fue más cálida que la zona rural, manifestando la presencia de ICUs. En este periodo, las pérdidas de calor por evaporación y transpiración de la vegetación en el área rural no superan en magnitud el calentamiento que presenta la ciudad.

En cada escena mostrada se pudo observar la variabilidad de la distribución de la TS intraurbana debido a que está condicionada directamente por los usos de suelo, por lo que se demostró que existen diversas islas (cálidas y frías) al interior de la ciudad y no una sola. El área comercial más grande e importante de la ciudad en el noreste fue donde se presentaron las anomalías positivas más grandes sin un patrón de comportamiento temporal específico, ya que en las cuatro épocas del año la intensidad fue similar entre sí. El origen de este aumento en la TS se debe a las características de estas zonas ya que en su mayoría se trata de espacios con poca vegetación en los camellones y edificaciones de concreto con techos ligeros contruidos a base de láminas, así como grandes espacios dedicados a cajones de estacionamiento.

Aunado a estas áreas, también hubo presencia de temperaturas elevadas, aunque en menor magnitud, en el centro oriente de la ciudad donde se localizan el Complejo Tres Centurias, el Museo Espacio y el Hospital Miguel Hidalgo que se componen de edificios separados y con pocas áreas verdes, el resto del espacio que no está ocupado por edificios, funge como estacionamientos.

Las zonas frías sobre el Club Campestre y Residencial Pulgas Pandas se caracterizaron por poseer vegetación densa que todo el año se riega debido a que también albergan campos de golf en su interior, por lo que exhiben las condiciones idóneas de humedad tanto en el suelo como en el aire para reducir considerablemente la TS vía calor latente a lo largo del año (Rasul, et al., 2017); sin embargo las mayores intensidades en estas pequeñas islas frías intraurbanas alcanzaron su máximo en la mitad cálida del año, principalmente en primavera. En este sentido, también se encontró que las islas cálidas, aunque tienen menor magnitud, son más visibles en la mitad fría del año.

Estos resultados se ajustan en lo general con los estudios realizados por Pei, et al. (2009), Amanollahi, et al. (2016), Ali, et al. (2017) y Wang, et al. (2018) en las ciudades de Xuzhou, China; Kuala Lumpur, Malasia; Bhopal, India y Yangon en Myanmar en donde se encontró que los usos de suelo, tales como las construcciones exhibieron temperaturas superficiales más elevadas que las áreas vegetadas.

En cuanto a la variación anual, en el año 2015 (año Niño) se registraron temperaturas más elevadas que en 2013 (neutral), lo que provocó la modificación en la distribución de la intensidad de TS, específicamente en el mes de enero, sin embargo la proporción en la magnitud de las diferencias rural-urbano se mantuvieron constantes en todas las temporadas del año. Una situación importante a considerar es que existen ciertas limitaciones al utilizar este enfoque que compara pocas imágenes entre diferentes años, debido a que los días seleccionados de uno u otro año pueden estar bajo influencia de fenómenos meteorológicos que perturbarán la TS de manera significativa.

Finalmente es importante resaltar que los valores registrados en las islas superficiales no alcanzan ni en magnitud ni en dimensión espacial a los registrados en otras ciudades más grandes y densificadas al interior, por ejemplo la ciudad de México (Jáuregui, 1997; Cui y De Foy 2012), sin embargo evidencian la presencia del efecto urbano en las temperaturas superficiales a pesar del tamaño medio de la ciudad.

A modo de complemento, también se construyeron gráficas de la temperatura horaria del aire para el periodo diurno de los días que corresponden a la captura de las imágenes satelitales. En todas ellas se observó una temperatura más elevada en la estación Universidad en comparación con San Jacobo (Figura 4.6).

A lo largo del día, en meses como enero, mayo y junio, principalmente en 2013, las temperaturas en la zona urbana y en la zona rural fueron iguales entre sí o cercanas entre las 9:00 y 10:00 am aproximadamente. En cambio, por las tardes se presentaron los mayores contrastes de temperatura, siendo la ciudad la más cálida debido a que los materiales que predominan en la ciudad se encargan de absorber

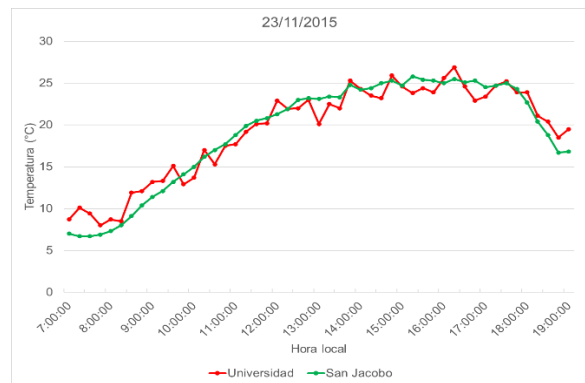
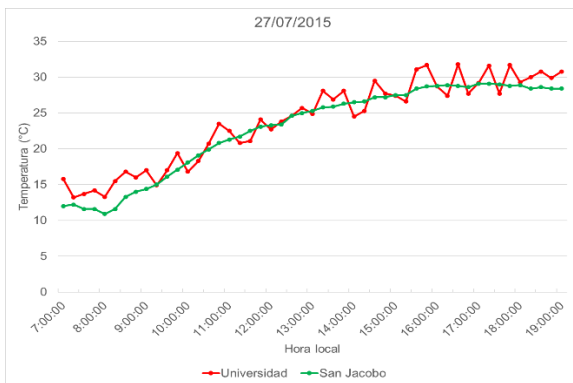
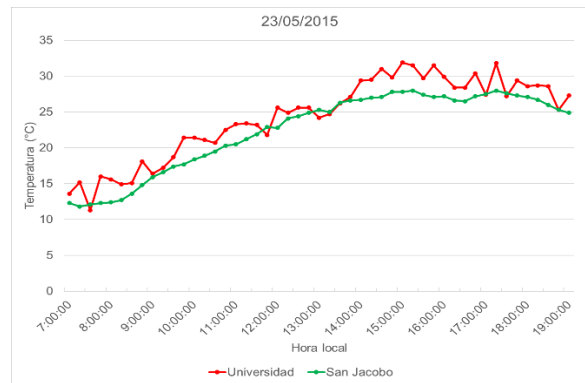
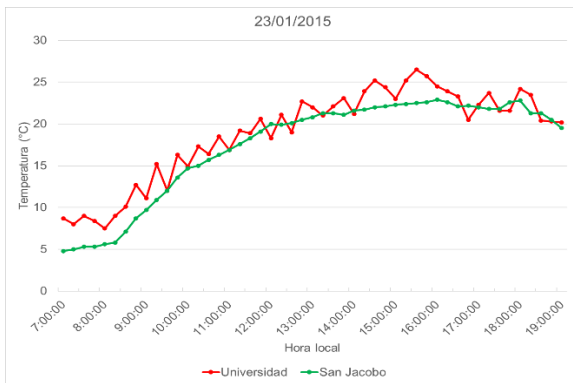
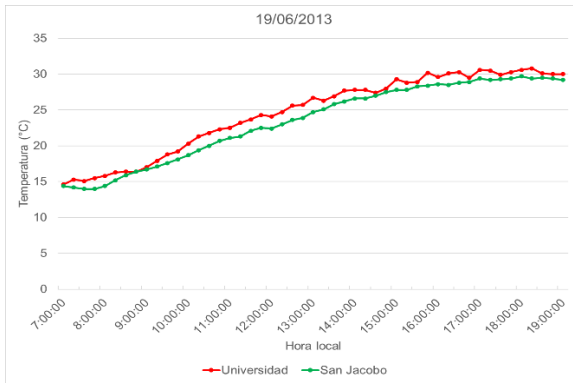
calor durante todo el día y hacia el atardecer se comienza a liberar paulatinamente, lo que evidencia el comportamiento típico de la isla de calor atmosférica (Voogt y Oke, 2003; Sangines, 2013). Este fenómeno naturalmente, sigue repitiéndose a lo largo de las horas subsecuentes del atardecer (Yamashita,1988)

Por otro lado, cuando se compararon los dos años de estudio, se evidenció que en las gráficas del año 2015 la temperatura en la ciudad tuvo variaciones más grandes en periodos cortos, en comparación con la estación rural que tuvo un comportamiento más continuo a lo largo del día.

Durante la hora de la toma de las escenas, no se identificó la presencia de islas frías con los datos de las estaciones meteorológicas, situación que sí ocurrió mediante el uso de las imágenes satelitales. Voogt y Oke (2003), así como Rasul, et al. (2016) y Rasul, et al. (2017) refieren que las islas frías se registran mejor con sensores remotos.

**Figuras 4.6a-h Marcha diurna de la temperatura para días seleccionados, estación Universidad y San Jacobo, 2013 y 2015**





Fuente: elaboración propia con datos de las estaciones meteorológicas automatizadas del INIFAP.

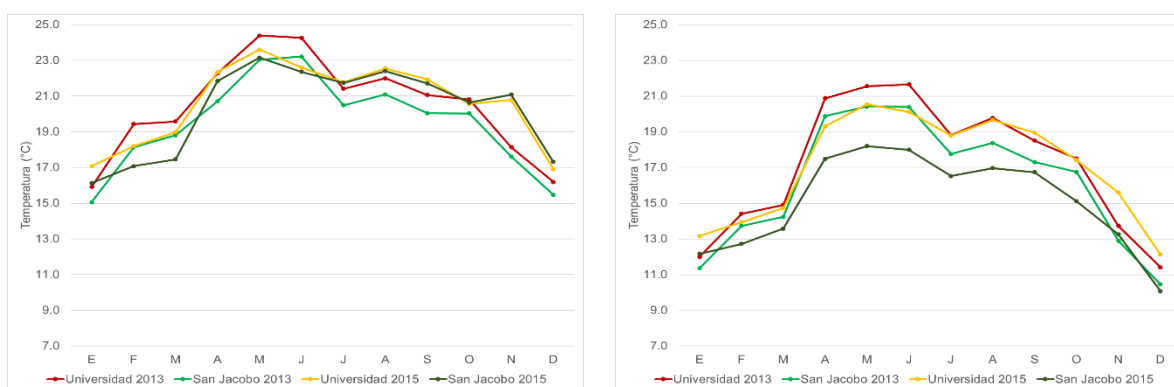
#### 4.2 Isla de Calor Urbana atmosférica

La ICU dentro de la capa del dosel urbano se identificó con el uso de una estación meteorológica urbana (Universidad) y otra rural (San Jacobo), los resultados se presentan a continuación.

En el periodo diurno (Figura 4.7a) del año 2013 los meses que registraron mayor diferencia urbano-rural fueron abril y mayo con +1.6 y +1.4°C respectivamente, mientras que la menor diferencia (positiva) sucedió hacia noviembre con +0.5°C; cabe destacar que en todos los meses las temperaturas urbanas fueron superiores al área rural. En contraste, en el año 2015 los tres primeros meses del año tuvieron diferencias positivas de más de +1°C, así como los tres últimos meses del año fueron los únicos en toda la serie de tiempo que presentaron diferencias negativas cercanas a 0°C, es decir hubo una ligera isla fría, especialmente en diciembre (-0.4°C).

En cuanto al ciclo nocturno se refiere (Figura 4.7b) 2013 fue un año con temperaturas más elevadas en el área urbana en todos los meses, específicamente en agosto con +1.4°C, mientras que la menor diferencia ocurrió en enero (+0.6°C). En 2015 el comportamiento de la temperatura del aire fue similar al 2013 presentando en todos los meses temperaturas mayores en la estación Universidad, pero además las diferencias urbano-rural se acentuaron con respecto al año anterior, ya que el mes con la ICU más intensa fue nuevamente agosto pero presentó una diferencia de +2.7°C y enero tuvo la ICU más débil de +1°C.

**Figuras 4.7 (a) Marcha diurna y (b) nocturna de la temperatura del aire, Universidad y San Jacobo, 2013 y 2015**



Fuente: elaboración propia con datos de las estaciones meteorológicas automatizadas del INIFAP.

El ciclo horario promedio de la temperatura (Figuras 4.8) mostró un comportamiento característico de ésta con la máxima diferencia presentada al atardecer para todos

los meses del año, a excepción de noviembre en el 2015 en donde se presenta un decremento considerable de temperatura principalmente en la estación rural, poco después de haberse presentado el máximo. Asimismo, en la mayor parte del día de ambos años, la temperatura rural es más baja que en la estación urbana, especialmente en el mes de enero, que es el mes más frío del año y en donde la oscilación térmica puede llegar a ser más evidente.

**Figuras 4.8a-d Marcha de la temperatura del aire a lo largo del día por meses, Universidad y San Jacobo, 2013 y 2015**



Fuente: elaboración propia con datos de las estaciones meteorológicas automatizadas del INIFAP.

En 2013 todos los meses presentaron temperaturas más cálidas dentro de la ciudad con respecto al área rural. La máxima variabilidad ocurrió en dos periodos del día; el primero fue por las mañanas, entre las 8:00 y 10:00 am destacando atípicamente islas más cálidas en mayo (+1.8°C) y junio (+1.6°C), así como una ligera isla fría en noviembre (-0.2°C). El segundo periodo sucedió por las tardes, después de las 5:00 pm, siendo más intenso para junio (+1.6), mayo (+1.5°C) y noviembre (+1.3°C)

respectivamente. Esto último corresponde con la descripción del comportamiento de las ICU atmosféricas mencionada párrafos arriba, donde se estableció que la máxima diferencia se alcanza hacia el atardecer (Sangines, 2013), en cuyo caso la ciudad de Aguascalientes presentó este patrón a excepción de enero en donde la diferencia de temperatura fue cercana a 0.

En 2015 hubo una ICU moderada y constante únicamente en enero ya que en el resto de los meses se notó en mayor medida la variabilidad a lo largo del día. De igual manera, en este año hubo tres periodos de máximas diferencias en la temperatura horaria, solo que éstos difieren del año anterior y no se presentaron de la misma manera para todo el año. El primero se localizó hacia las madrugadas de mayo (+2.2°C), junio (+1.8°C) y noviembre (+2.3°C); el segundo en las primeras horas de la mañana donde únicamente enero tuvo +1.7°C, mientras que mayo, junio y noviembre tuvieron diferencias negativas (-0.9, -0.8 y -3°C respectivamente), es decir islas frías débiles en los primeros dos y fuerte en el último; el tercer periodo ocurrió en el atardecer, siendo mayo (+3°C), junio (+3.3°C) y noviembre (+4°C) los meses con diferencias mayores.

La variabilidad propia de la temperatura en la región donde se ubica la ciudad de Aguascalientes influyó directamente en la intensidad de las ICU, en consecuencia se presentaron tanto islas diurnas como nocturnas más intensas durante la primavera y el verano. El resto de los meses estudiados también tuvieron presencia de ICU pero fueron de menor magnitud, especialmente hacia los meses del invierno. Por otro lado, las islas frías fueron poco comunes, de hecho sólo hubo 3 durante el año 2015. La de mayor magnitud alcanzó los -3°C en noviembre.

Un comportamiento que resaltó en el 2015 fue que en los meses graficados, a excepción de enero, se registraron ICU intensas durante las tardes, la mayor magnitud se alcanzó en noviembre con +4°C, situación que también ocurrió en 2013, sin embargo las intensidades no se encontraron más allá de los +1.8°C. Lo anterior confirma que las temperaturas del aire en esta escala espacial no sólo responden al efecto urbano, sino también a la modificación regional debida al fenómeno de El Niño.



Al realizar la comparación entre las temperaturas presentadas en este apartado y las temperaturas diurnas de los días de la toma de las imágenes satelitales se encontraron patrones distintos debido a la reducción de la escala temporal.

Por ejemplo, al graficar las temperaturas diurnas de los días de la toma de las imágenes satelitales, las ICU se manifestaron más claramente durante las tardes del 2013. Además aquí destacaron la presencia de mañanas más frescas en enero y noviembre de ambos años en la zona rural. Esto responde a que la temperatura en la mitad fría del año fue considerablemente más baja en la zona rural, mientras que dentro de la ciudad el calor almacenado durante el día anterior continuó disipándose al amanecer, generando así mañanas mucho más cálidas, propias del fenómeno de la isla de calor.

Mientras que las gráficas horarias diurnas/nocturnas por mes representaron de manera más generalizada el comportamiento de la temperatura a lo largo del año, lo que permitió visualizar los meses con mayor y menor temperatura tanto en la ciudad como en el área rural. Finalmente, las gráficas de temperatura horaria mensual sí logaron mostrar mejor la intensidad de la ICU e IFU, sin embargo, aunque la presencia de las islas hacia el amanecer y el atardecer concuerda con la literatura citada, este comportamiento no sucedió siempre, por lo que se sugiere que al graficar las temperaturas para días específicos, es posible captar mejor las islas en la ciudad de Aguascalientes.

#### **4.3 Isla de Calor Urbana simulada**

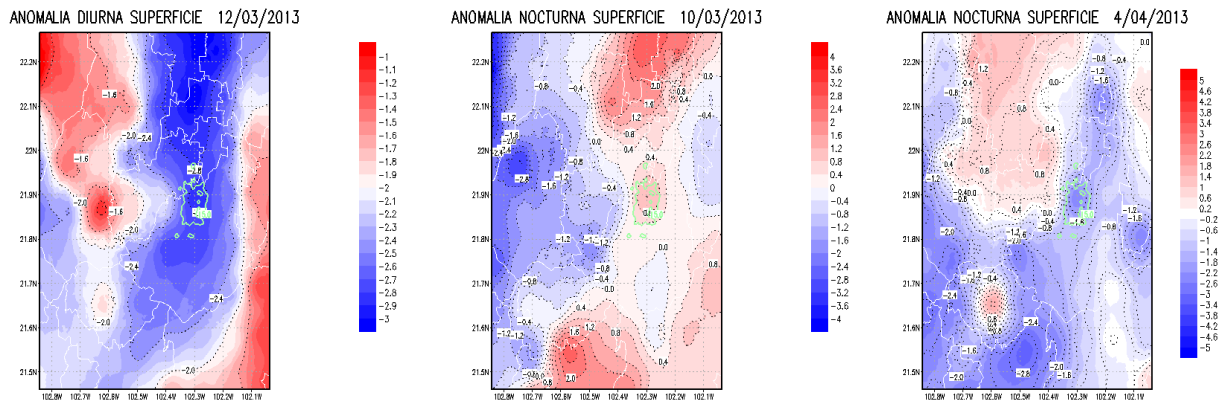
El simulado de las temperaturas mediante CALMET ofreció información con una amplia distribución espacial sobre el comportamiento de la isla de calor principalmente por las noches, que es en donde hubo un vacío de datos debido a que Landsat 8 es un sensor pasivo que únicamente recoge imágenes en el día.

Durante los días de la primavera (Figuras 4.9) se encontró poca evidencia del efecto urbano, el único día que exhibió una isla fría fue el 12 de marzo con una anomalía de  $-2.3^{\circ}\text{C}$ , sin embargo este comportamiento fue debido al paso de un frente frío

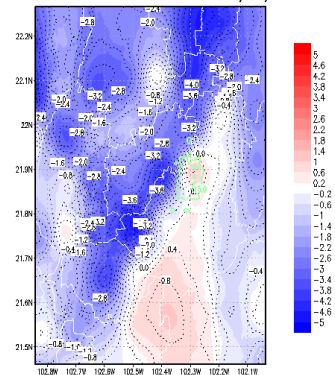
que causó una baja de temperatura en todo el estado (NASA, 2019) (Figura 4.9a). Si bien por las noches hubo presencia tanto de islas frías como cálidas, fue en mayo donde destacaron especialmente por su magnitud las fechas del 5 de mayo con  $-3.8^{\circ}\text{C}$  (Figura 4.9f), la del 8 de mayo con  $-2.6^{\circ}\text{C}$  (Figura 4.9g), 11 de mayo con  $-3^{\circ}\text{C}$  (Figura 4.9h) y una isla cálida el 22 de mayo de  $+3^{\circ}\text{C}$  (Figura 4.9i).

Durante estos meses primaverales, las lluvias aún son incipientes, por lo que los alrededores rurales con vegetación natural permanecen ligeramente secos permitiendo que retengan más calor por las noches en comparación con los materiales al interior de la ciudad, generando las islas frías (Rasul, et al., 2016). Sin embargo, no hay suficiente evidencia para señalar este comportamiento como un patrón común de las temperaturas en esta temporada.

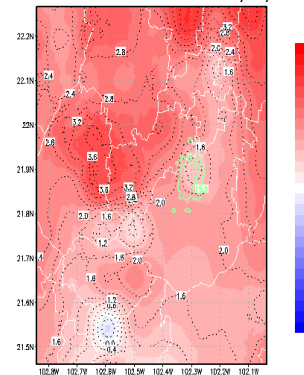
**Figuras 4.9a-i Temperatura simulada a 10 m de altura, periodo diurno y nocturno de primavera**



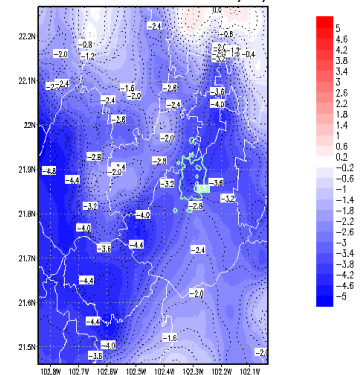
ANOMALIA NOCTURNA SUPERFICIE 11/04/2013



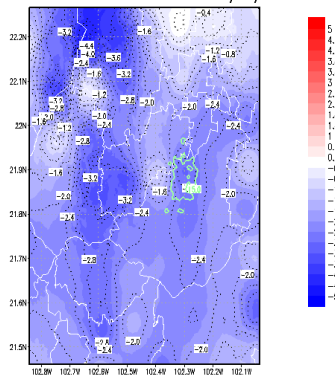
ANOMALIA NOCTURNA SUPERFICIE 24/04/2013



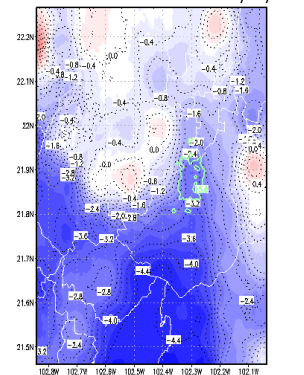
ANOMALIA NOCTURNA SUPERFICIE 5/05/2013



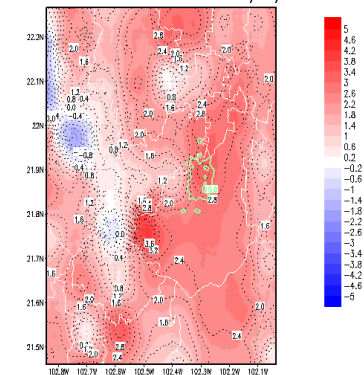
ANOMALIA NOCTURNA SUPERFICIE 8/05/2013



ANOMALIA NOCTURNA SUPERFICIE 11/05/2013



ANOMALIA NOCTURNA SUPERFICIE 22/05/2013

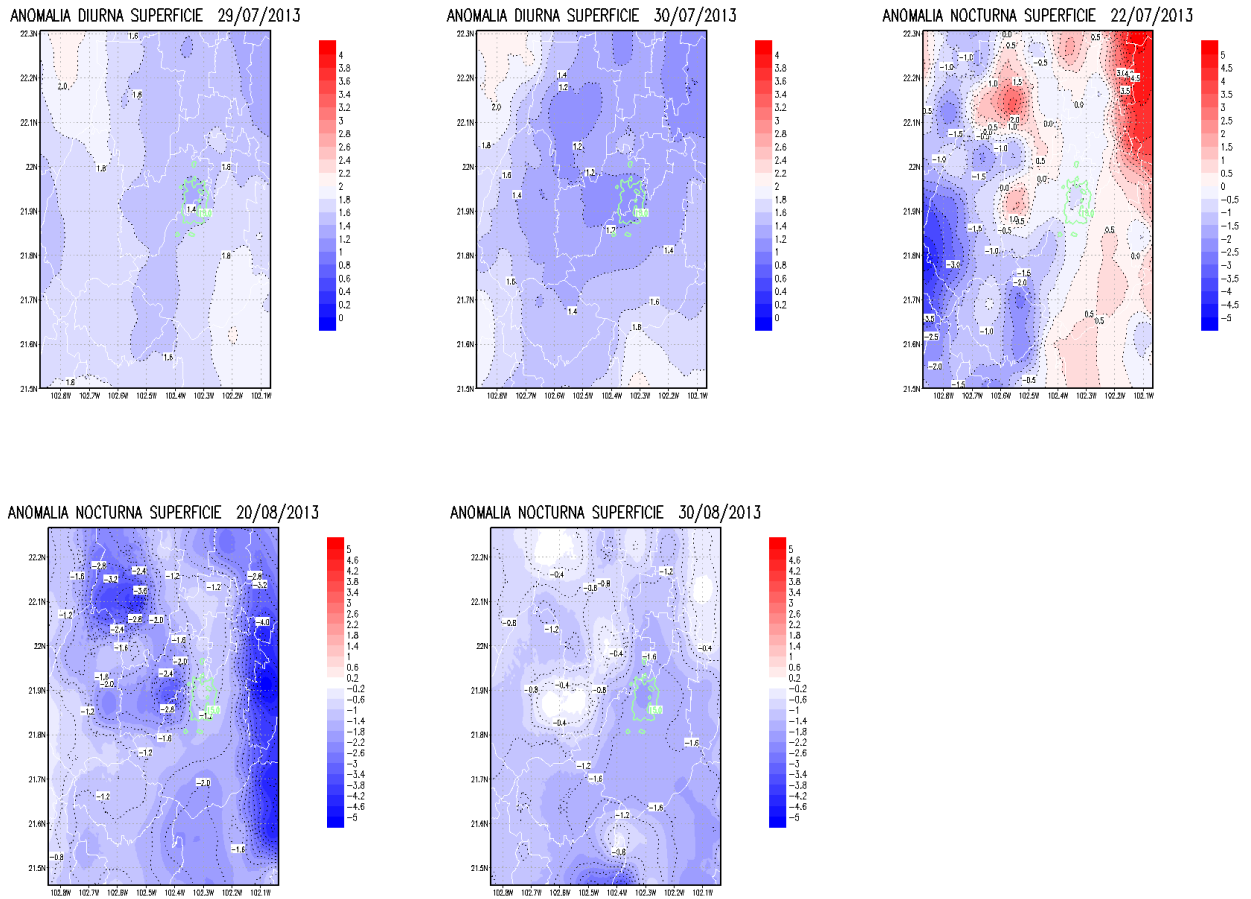


Fuente: elaboración propia con base en las salidas del modelo CALMET.

Durante los días del verano hubo algunas islas cálidas sobre la ciudad. Las diferencias rondaron los  $+1.3^{\circ}\text{C}$  y únicamente fueron visibles en dos días de julio (Figuras 4.10a y b). De acuerdo con Rasul, et al. (2017) es común encontrar islas cálidas urbanas en los meses lluviosos del verano, ya que la vegetación en las áreas rurales de los alrededores de la ciudad que había permanecido seca hasta entonces, ahora dispone de agua para reducir la temperatura vía calor latente a través de la evaporación, provocando que estas áreas sean más frescas cuando se comparan con la ciudad.

Por las noches también se observó poca evidencia de diferencias entre la temperatura rural-urbano, sin embargo también hubo islas frías aunque menos intensas que en primavera, de magnitud promedio de  $-1.3^{\circ}\text{C}$  (Figuras 4.10c, d y e).

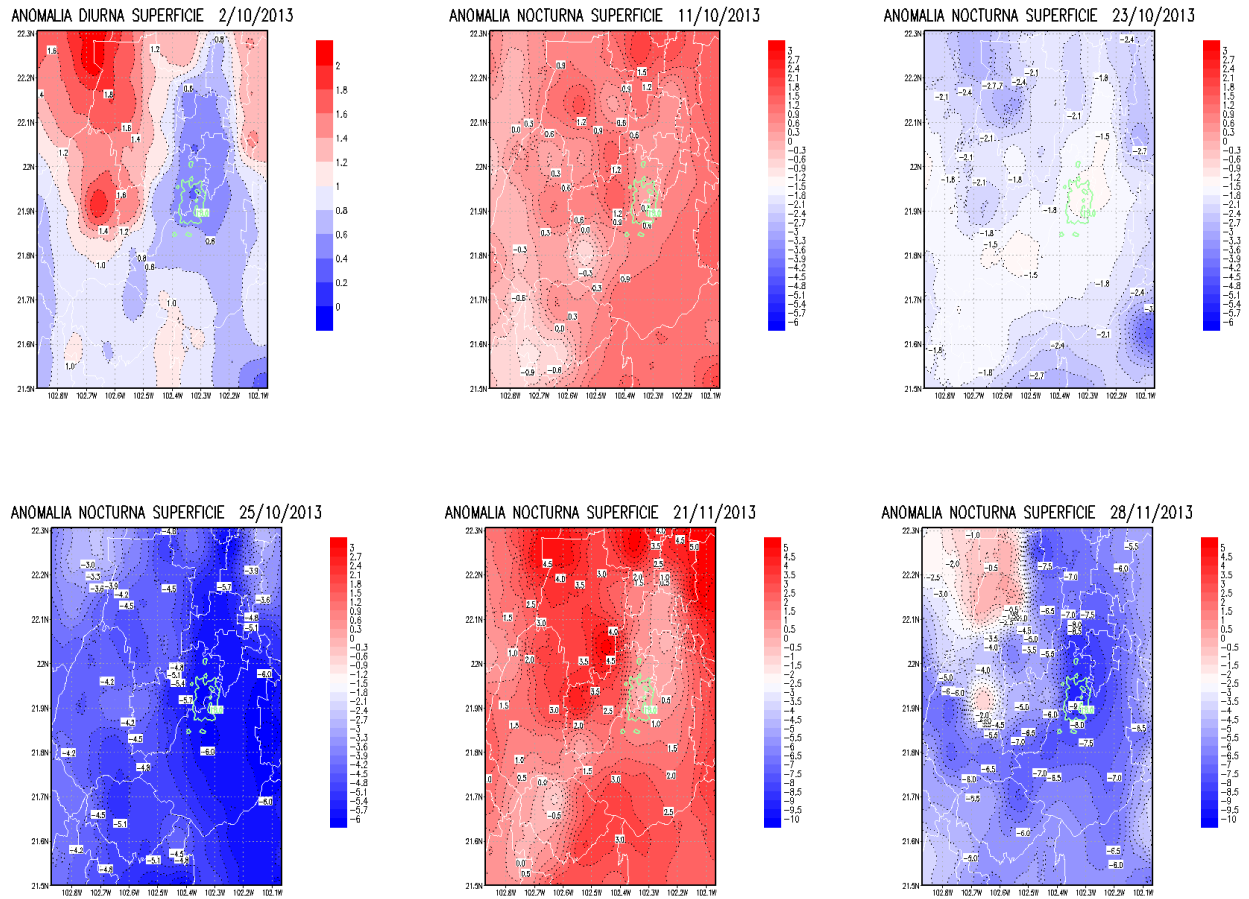
**Figuras 4.10a-e Temperatura simulada a 10 m de altura, periodo diurno y nocturno de verano, 2013**



Fuente: elaboración propia con base en las salidas del modelo CALMET.

Para los meses de otoño sólo se encontró un día en el que hubo una débil anomalía positiva en octubre (Figura 4.11a). En el caso nocturno, las simulaciones que mostraron el efecto urbano en las temperaturas revelaron que hubo mayoritariamente islas frías, ya que se presentaron anomalías negativas o positivas cercanas a 0°C. Resaltó el caso del 28 de noviembre con -9°C (Figura 4.11f) debido a que hubo un enfriamiento generalizado en la región por el Frente frío No. 14 (CONAGUA, 2013). Aquí se muestra cómo el efecto urbano se ve rebasado por las condiciones meteorológicas a mayor escala que predominaron en esa semana.

**Figuras 4.11a-f Temperatura simulada a 10 m de altura, periodo diurno y nocturno de otoño, 2013**



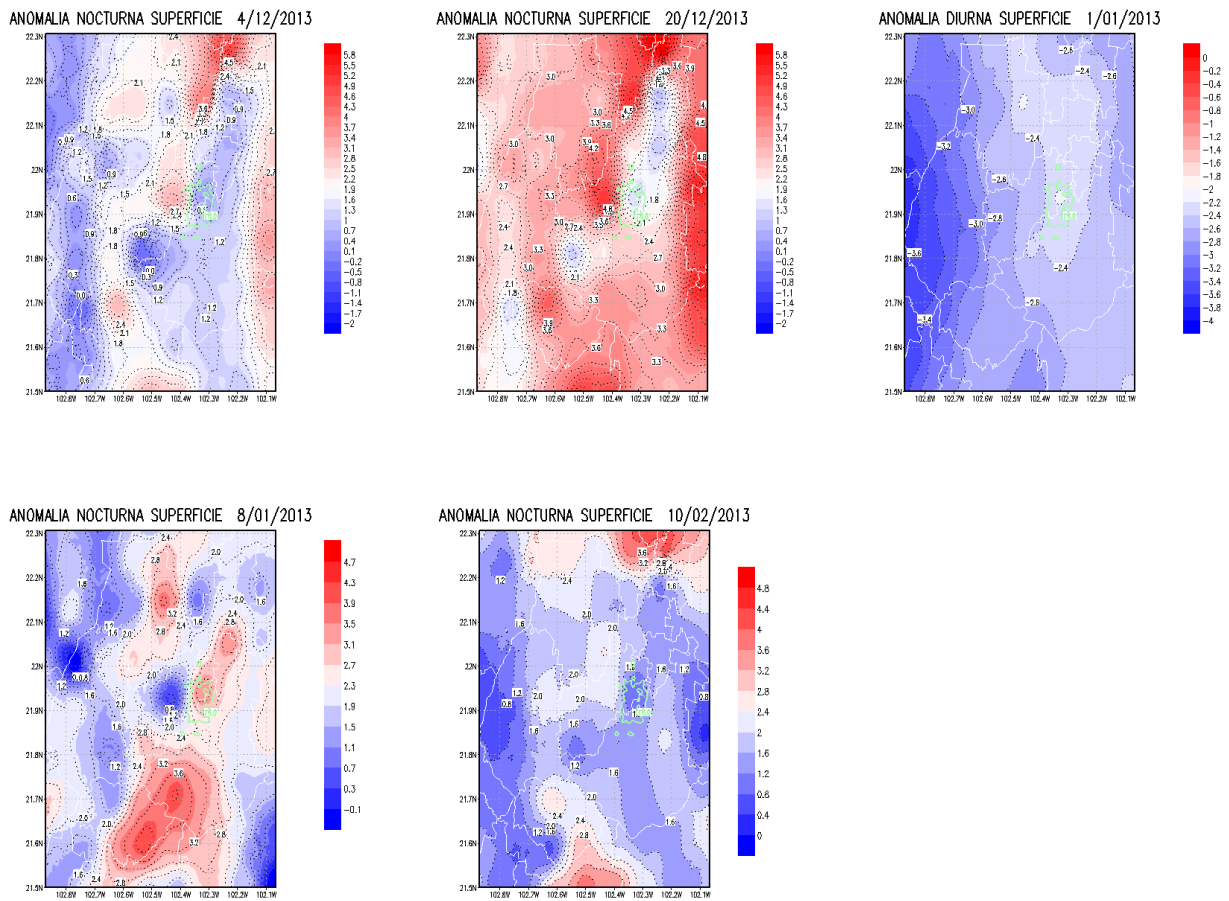
Fuente: elaboración propia con base en las salidas del modelo CALMET.

En los meses invernales en el periodo diurno se identificó sólo un día con isla fría de magnitud  $-2.3^{\circ}\text{C}$  en enero (Figura 4.12c). En el periodo nocturno predominaron las islas cálidas dentro de la ciudad con promedio de  $+1.7^{\circ}\text{C}$ ; las islas mejor delineadas tuvieron valores de  $+3^{\circ}\text{C}$  y  $+1.5^{\circ}\text{C}$  (enero y febrero respectivamente) (Figuras 4.12). Lo que se muestra en los mapas de esta temporada se ajusta en lo general a lo señalado en diversos estudios de ciudades en climas áridos y semiáridos (Rasul, et al., 2016; Rasul, et al., 2017), ya que durante los días tiende a haber islas frías debido a que la vegetación seca presente en la zona rural, en este caso principalmente hacia el oriente y occidente, es capaz de almacenar más

calor que la propia ciudad. Sin embargo, en las noches el calor almacenado por la misma ciudad, induce a la presencia de las islas cálidas, cumpliéndose así el ciclo diurno de las temperaturas en las ciudades con este tipo de climas.

Los mapas diurnos y nocturnos mostraron diferentes comportamientos a lo largo de las estaciones del año que deben usarse con cautela debido a que no fue posible encontrar suficiente evidencia para establecer patrones comunes. En invierno fue la única temporada donde se encontró un comportamiento parecido a lo que la literatura consultada señala como el comportamiento típico de las temperaturas en los meses secos.

**Figuras 4.12a-g Temperatura simulada a 10 m de altura, periodo diurno y nocturno de invierno, 2013**



Fuente: elaboración propia con base en las salidas del modelo CALMET.



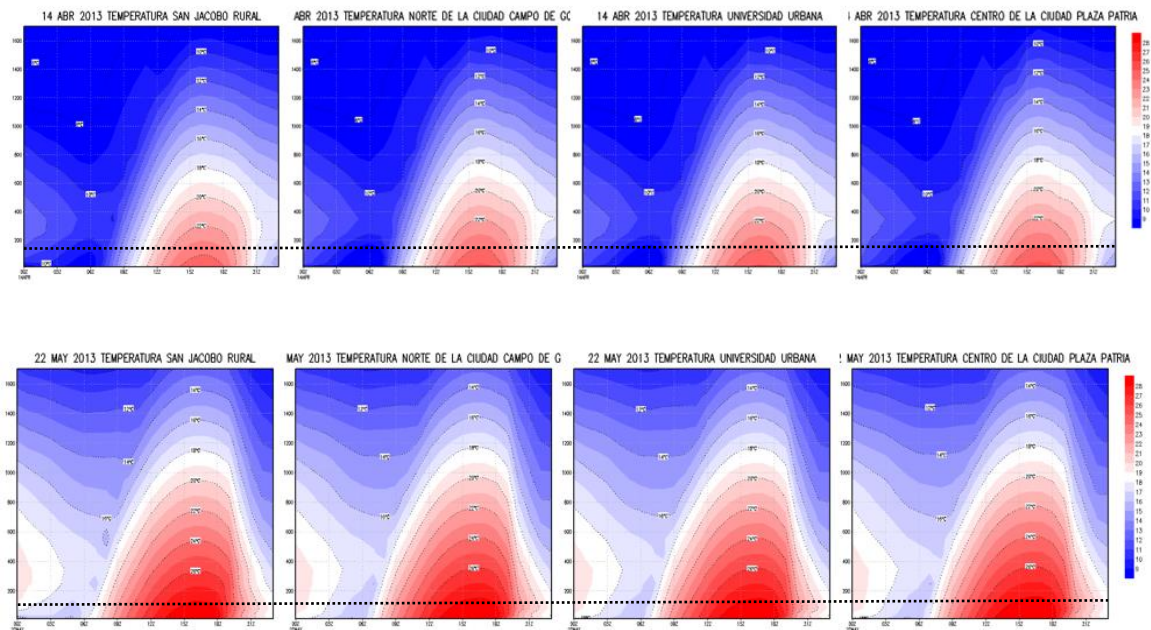
También se construyeron perfiles atmosféricos en puntos elegidos con usos de suelo contrastantes dentro y fuera de la ciudad que describieron el comportamiento de la temperatura del aire modelada a diferentes alturas.

En primavera (Figuras 4.13) se pudo observar el ciclo de la temperatura en las capas bajas de la atmósfera. La temperatura aumentó paulatinamente desde el amanecer con un pico máximo entre las 3:00 y 4:00 pm, posteriormente decreció nuevamente hacia el anochecer. En las madrugadas también hubo un comportamiento estándar de disminución de la temperatura hasta la salida del Sol.

A lo largo de la primavera, los días más cálidos se registraron principalmente en los meses de abril y mayo, similar a lo reportado por las estaciones en superficie.

En cuanto a la variación en las diferentes localizaciones dentro y fuera de la ciudad, se presentaron ligeros cambios entre sí, por ejemplo la isoterma más cálida se encontró a menor altitud sobre la estación San Jacobo en comparación con la estación Universidad o el centro geográfico de la ciudad y únicamente en algunos días estuvo ligeramente más baja en el campo de golf.

**Figuras 4.13a-h Perfil de temperatura simulada en diferentes ubicaciones de la ciudad, primavera, 2013**

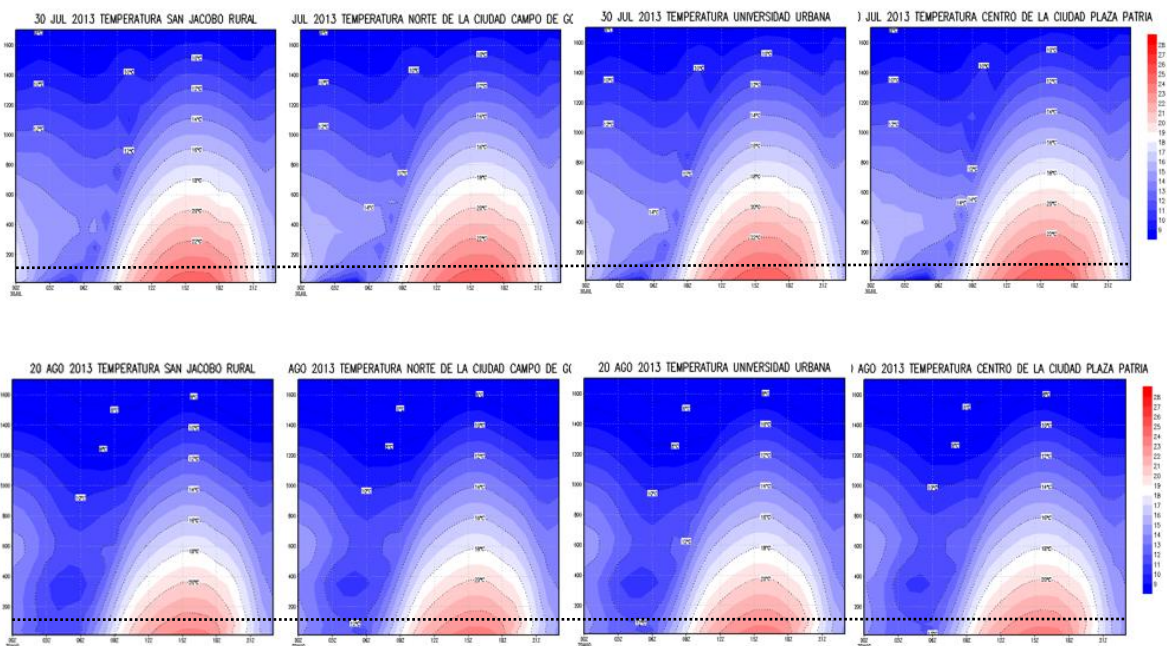


Para los meses de verano (Figuras 4.14) se observó una disminución considerable en la temperatura máxima debido a su variación habitual mensual, así como una menor oscilación térmica y de la presencia de lluvias constantes por la tarde, especialmente en julio y septiembre (canícula de verano).

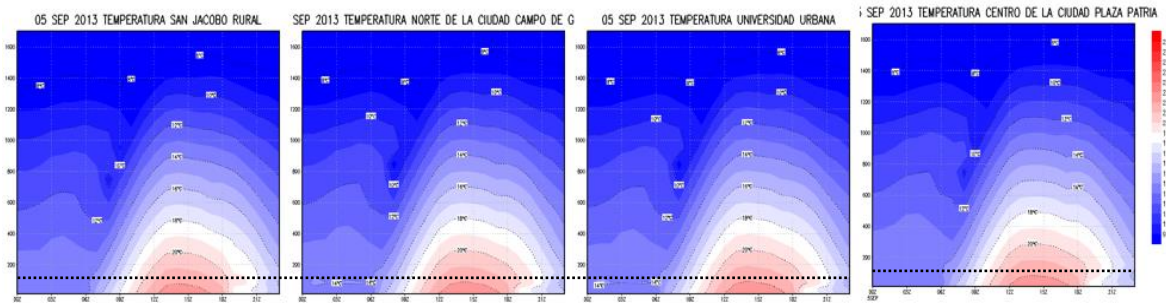
El pico máximo de temperatura no estuvo fijo como sí en la primavera, ya que aquí algunos días sucedió a las 3:00 pm y otros se recorrió hasta las 6:00 pm, pero en general el promedio estuvo entre estos horarios. A partir de este horario, la temperatura comenzó a descender.

La Plaza Patria en el centro de la ciudad fue el lugar que exhibió una isoterma máxima más alta en todos estos meses, seguido de la estación Universidad. Por otro lado, San Jacobo fue el lugar más fresco, demostrando el efecto urbano en la vertical, mientras que el campo de golf no presentó diferencias considerables con los otros sitios.

**Figuras 4.14a-I Perfil de temperatura simulada en diferentes ubicaciones de la ciudad, verano, 2013**





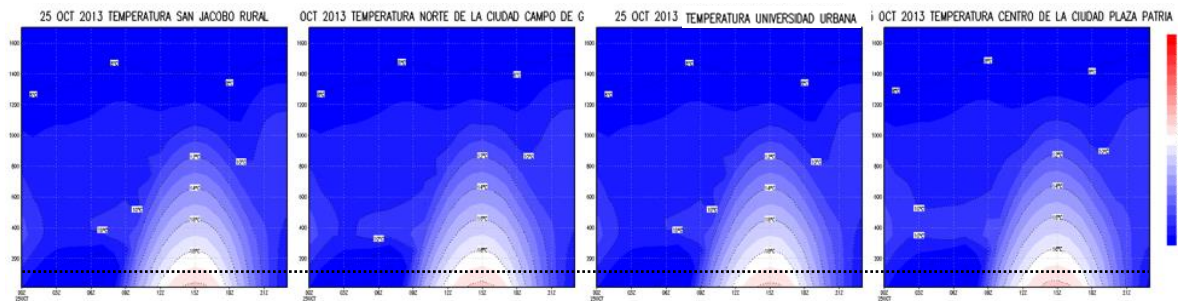


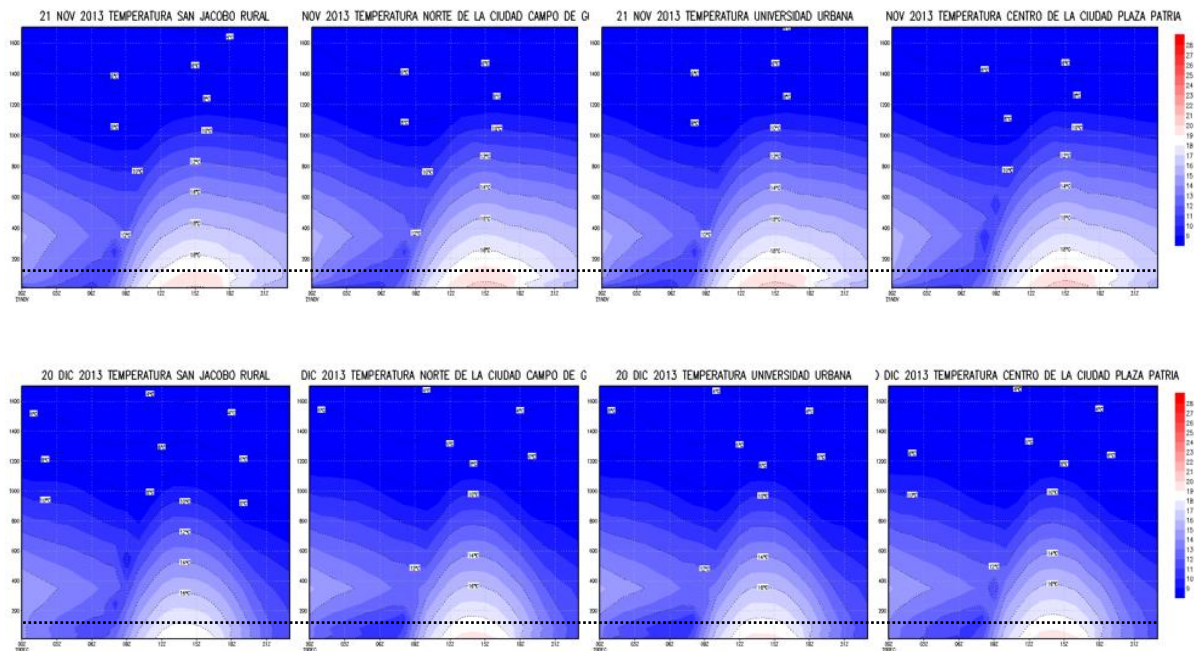
Fuente: elaboración propia con base en las salidas del modelo CALMET.

El otoño presentó temperaturas más bajas que primavera y verano en todos los perfiles (Figuras 4.15). Se observó que el máximo de temperatura tuvo variaciones a lo largo del día, pues ocurrió entre las 2:00 pm y las 4:00 pm, es decir, se adelantó en comparación con las otras estaciones. Asimismo el enfriamiento ocurrió poco antes de las 6:00 pm. Cabe destacar que las isotermas tuvieron forma más plana y alargada en la parte baja de la atmósfera, efecto que contrasta fuertemente con la forma de campana de la primavera.

Como ha sucedido en los meses anteriores, en otoño también se observó la altura máxima sobre el centro de la ciudad, mientras que San Jacobo presentó la isoterma máxima más baja.

**Figuras 4.15a-l. Perfil de temperatura simulada en diferentes ubicaciones de la ciudad, otoño, 2013**



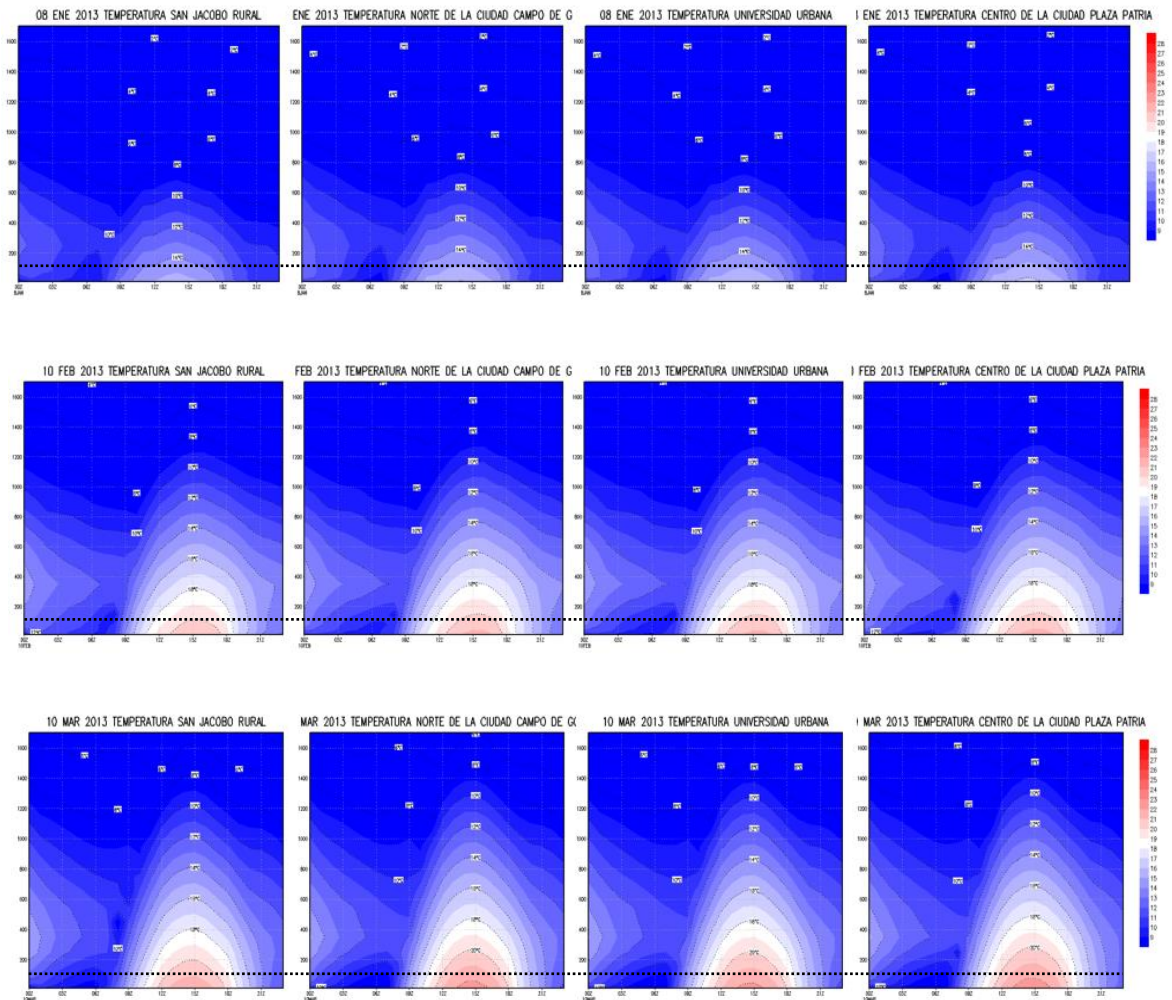


Fuente: elaboración propia con base en las salidas del modelo CALMET.

En invierno (Figuras 4.16) las temperaturas de la parte baja de la atmósfera fueron las más bajas (en magnitud) de todo el año, especialmente en enero. Además la mayor altura de estas isoterma se alcanzó alrededor de las 3:00 pm o antes, como en el caso de algunos días de enero. A diferencia de los otros meses, el enfriamiento comenzó alrededor de las 5:00 pm lo que está asociado a la variación interanual de la temperatura donde en estos meses la noche dura más que el día.

El perfil de temperatura de San Jacobo fue el que tuvo temperaturas más frescas, así como el del campo de golf que había tenido diferencias poco notables en las demás temporadas. Una vez más Plaza Patria fue el lugar más cálido, seguido por la estación Universidad.

**Figuras 4.16a-I. Perfil de temperatura simulada en diferentes ubicaciones de la ciudad de invierno, 2013**



Fuente: elaboración propia con base en las salidas del modelo CALMET.

La presencia de ICU ocurrió en todas las estaciones del año, fue visible únicamente por las tardes (por la noche no se encontró evidencia de islas cálidas) y realizando la comparación entre los perfiles de la ciudad con los de la estación rural. De manera general se observó que las diferencias de temperatura en todos los perfiles estuvieron influidas por la marcha interanual de la temperatura, por lo que las mayores temperaturas ocurrieron en mayo y las más frescas en enero.

Los perfiles sobre la Plaza Patria, independiente de la estación del año, fueron los que exhibieron isotermas cálidas más altas en la vertical (cercana a los 200 m en

mayo, aproximadamente a 150 m en el verano y menos de 100 m en otoño e invierno) debido a que este espacio, siendo el principal lugar de reunión en la ciudad, está conformado por una explanada de concreto rodeada por la catedral de Aguascalientes, así como del Palacio Municipal y únicamente un pequeño jardín con área arbolada, que no logra atenuar el calor antropogénico generado en los alrededores que constituyen calles con un importante tránsito de personas y de automóviles todos los días. En contraste, la estación rural San Jacobo tuvo las isothermas cálidas a menor altitud cuando se comparaban los perfiles de un mismo día, demostrando que a las afueras de la ciudad, la capa límite urbana presentó una menor temperatura en comparación con el interior (Oke, 1995).

#### **4.4 Discusión y conclusiones**

La creación de la ciudad de Aguascalientes tuvo como propósito establecer un punto de reunión político, económico, administrativo y religioso para los habitantes de la región. Con el paso de los años y del continuo crecimiento poblacional a nivel nacional, se convirtió en la capital del estado del mismo nombre ya que constituía su asentamiento urbano más grande, sin embargo seguía teniendo poca extensión a comparación de las ciudades más importantes del país. A partir de la década de los 70's, no sólo la ciudad de Aguascalientes, sino muchas otras ubicadas en otros estados, comenzaron su crecimiento y expansión urbana gracias a la creciente industrialización que predominó durante esta década y que como consecuencia, atrajo a población periférica de escasos recursos hacia los centros urbanos en busca de mejores condiciones de vida.

En años posteriores este fenómeno se vio fortalecido además por los apoyos del gobierno federal al desarrollo de ciudades medias, y específicamente para la ciudad de Aguascalientes contribuyó todavía más al aumento poblacional la descentralización administrativa en la ciudad de México. Esta llegada constante de personas a habitar la ciudad, junto con los procesos antes mencionados indujeron la expansión urbana concéntrica alrededor de los barrios originales que se mantiene hasta la fecha.

Como en cualquier ciudad naciente y en constante crecimiento, el suelo natural es una de las modificaciones más drásticas que experimenta dicho espacio. Las coberturas vegetales naturales en la ciudad de Aguascalientes fueron reemplazadas principalmente con concreto, edificios, casas y superficies impermeables, pero también ocurrió que la vegetación propia de la región se sustituyó con cubiertas vegetales inducidas para conformar los espacios de recreación y ocio necesarios para la población. Como resultado de esta combinación de usos de suelos con diferente capacidad termal, rugosidad, albedo, emisividad y capacidad para retener humedad, se generaron cambios en la estructura de la atmósfera baja sobre la ciudad, ahora llamada atmósfera urbana.

Estas modificaciones se manifestaron principalmente en el aumento de las temperaturas al interior de la ciudad y en diferentes estratos de la atmósfera urbana que fueron medidos en esta investigación mediante diversos métodos propios de la Climatología urbana (Oke, et al., 2017).

Una de las técnicas que desde hace varias décadas ha sido utilizada para identificar la isla de calor es el uso de la percepción remota. La radiación electromagnética captada por los sensores montados en los satélites permite cuantificar la isla de calor superficial con alta resolución espacial. Sin embargo es importante recordar que los resultados aquí presentados son una estimación de la temperatura de superficie a la que se ha llegado mediante diversos cálculos matemáticos, además de que sólo constituyen un momento específico en el tiempo. Durante la realización de este trabajo se ha comprobado que las ICUs son principalmente causadas por las diferencias en el calentamiento de las superficies radiativas entre el área rural y urbana durante el día (Choi, et al., 2014).

El uso de las imágenes Landsat 8 reveló que existe un patrón diferenciado de la ICUs en la ciudad de Aguascalientes que varía en función de los usos de suelo, así como de la estación del año. Sin embargo hace falta analizar periodos de tiempo más largos, incluso apoyándose de otros satélites, para establecer con mayor precisión la variabilidad de las islas superficiales en la ciudad. Por último también es necesario llevar a cabo más estudios relacionados con la validación de la

derivación de las TS, ya que al tratarse de una estimación, pueden acarrarse errores en cualquier parte del proceso.

El uso de las estaciones meteorológicas de superficie permitió establecer el comportamiento de la ICU atmosférica. Los patrones encontrados revelaron que la variabilidad de la temperatura del aire sobre la ciudad está regida por el propio clima regional, así como por fenómenos de mayor escala (El Niño) coincidiendo con lo señalado por Yamashita (1988). De esta manera, la intensidad y duración de la ICU no fue constante ni en duración ni en magnitud a lo largo de los años de estudio.

A pesar de que la red de estaciones meteorológicas en superficie es escasa dentro de la ciudad, se encontraron patrones que corresponden con lo que la literatura citada señala como el comportamiento común de las ICU atmosféricas. No obstante, se recomienda utilizar más estaciones (si las hay disponibles) para determinar con mayor robustez y menor error el comportamiento de la isla atmosférica diurna e interanual. Si no es posible acceder a este tipo de datos, también es factible realizar recorridos intraurbanos con termómetros para captar la variabilidad de las temperaturas del aire en diferentes entornos.

El modelado en CALMET tuvo un papel importante específicamente al aportar datos nocturnos sobre los patrones espaciales de la temperatura sobre Aguascalientes y sus alrededores. Con ello se obtuvieron mapas de la distribución de las anomalías de la temperatura, así como perfiles en la vertical de la atmósfera sobre puntos elegidos dentro y fuera de la ciudad.

Estos mapas revelaron que, a una escala regional, la isla cálida/fría no se presenta en todos los días del año, ni durante todo el día. Esto responde al tamaño de la ciudad que, como se ha mostrado con los resultados anteriores, con el uso de otros datos con mayor resolución espacial es posible registrar este efecto urbano sobre las temperaturas. Por lo anterior, en ciertos meses del año hubo poca o ninguna evidencia de la presencia de una isla. Sin embargo se encontró un patrón característico en los meses invernales, aunque, de igual manera se debe tomar con reserva. Por su parte, los perfiles atmosféricos demostraron un efecto urbano diferenciado a lo largo del día en las temperaturas sobre distintos usos de suelo



que, si bien ya se había evidenciado en los mapas derivados de las imágenes satelitales, aquí también se hicieron presentes a una escala mucho más local a la que no se pudo acceder con los otros resultados obtenidos.

Estos resultados justifican el uso CALMET en investigaciones dentro del ámbito del clima urbano, ya que sin este no se hubieran podido construir los mapas nocturnos ni los perfiles atmosféricos, por lo que en sitios donde la red de estaciones es escasa o la nubosidad en las regiones tropicales del planeta no permitan tener una amplia disponibilidad de imágenes satelitales de calidad aceptable, el modelo resulta ser una opción viable. Asimismo, hay que tomar en cuenta que para utilizar el modelo se debe contar con el software, con una computadora capaz de correrlo por varias horas continuas, así como capacitarse para utilizarlo.

Con la evidencia hasta ahora presentada, se comprueba la hipótesis planteada ya que la isla de calor sobre la ciudad de Aguascalientes tiene variaciones en magnitud durante el día, de manera estacional y además está influida por el uso de suelo, así como por fenómenos climáticos como El Niño.

Es importante continuar con las investigaciones en este ámbito debido a que la ciudad de Aguascalientes indudablemente seguirá creciendo para consolidar su zona metropolitana. Por lo anterior, se requieren de estudios a mayor resolución espacial, por ejemplo a nivel de calle para establecer cómo cambia la ICU en los espacios más densamente poblados/transitados dentro de la ciudad. Igualmente, se sugiere ampliar los trabajos en el campo de conocimiento de las islas frías urbanas ya que en México aún es deficiente, sin embargo muchas ciudades del centro y norte del país son sujetas a ser estudiadas por encontrarse en climas áridos y semiáridos.

También se recomienda como trabajo a futuro el realizar investigaciones en el área de la Bioclimatología humana, ya que diversos autores (Jáuregui y Heres, 2008; Chen y Ng, 2011; Chen, et al., 2014) han identificado que una de las múltiples afectaciones que aqueja a la población urbana es el poco o nulo confort térmico que se experimenta en las ciudades. Diversos índices y modelos bioclimáticos, como el *Physiological Equivalent Temperature* o el *SkyHelios*, ofrecen la posibilidad de medir

el confort térmico a nivel de calle, sujeto por sujeto, o incluso a una escala más regional que abarque toda la ciudad.

Finalmente, también es necesario comprender cómo las islas de calor afectan la salud de los habitantes urbanos, ya que en una ciudad creciente como lo es Aguascalientes, cada año se agrega nueva población que llega a ella atraída por las ofertas laborales o educativas, constituyendo así un tema importante a tratar ahora para evitar problemas en la demanda de los servicios de salud en el futuro.



## Referencias

- Aguilar-Mata, G. (2005). *Proyección de la población del estado de Aguascalientes al año 2030*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM. CdMx, México.
- Alavipanah, S., Wegmann, M., Qureshi, S., Weng, Q., y Koellner, T. (2015). The role of vegetation in mitigating Urban land surface temperatures: a case study of Munich, Germany during the warm season. *Sustainability*. No 7, 4689-4706.
- Ali, S., Patnaik, S., y Madguni, O. (2017). Microclimate land surface temperatures across urban land use/land cover forms. *Global Journal Environment Science Manage*. Vol. 3. No. 3, 1-12.
- Amanollahi, J., Tzanis, C., Ramli, M., y Abdullah, A. (2016). Urban heat evolution in a tropical area utilizing Landsat imagery. *Atmospheric Research*. No. 167, 175-182.
- Arnfield, A. (2003). Review. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the Urban Heat Island. *International Journal of Climatology*. No. 23, 1-26.
- Barbagallo, S., Consoli, S., y Russo, A. (2009). A one-layer satellite surface energy balance for estimating evapotranspiration rates and Crop Water Stress Indexes. *Sensors*. No. 9, 1-21.
- Barradas, V. (1987). Evidencia del efecto de "Isla Térmica" en Jalapa, Veracruz, México. *Revista Geofísica*. No. 26, 125-135.
- Barradas, V. (1991). Air temperature and humidity and human comfort index of some city parks of Mexico city. *International Journal of Biometeorology*. No. 35, 24-28.
- Cervantes Pérez, J. (2001). *El uso de suelo en la Ciudad de México y su impacto al bioclima humano*. Tesis de doctorado, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México D.F.
- Cervantes Pérez, J., Barradas Miranda, V., Tejeda Martínez, A., y Pereyra Díaz, D. (2001a). Clima urbano, bioclima humano, hidrología y evaluación de riesgos por hidrometeoros. En E. U. C. Capitanachi, *Unidades ambientales urbanas: Bases metodológicas para la comprensión integrada del espacio urbano* (pág. 1-57). Xalapa, Veracruz, México: Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, A.C.
- Chandler, T. (1965). *The climate of London*. Gran Bretaña: Hutchinson of London.
- Che, X., Zhao, H., Li, P., y Yin, Z. (2006). Remote sensing image-based analysis the relationship between Urban Heat Island and land use/cover changes. *Remote sensing of environment*. No. 104, 133-146.

- Chen, A., Yao, A., Sun, R., y Chen, L. (2014). Effect of urban green patterns on surface urban cool islands and its seasonal variations. *Urban Forestry & Urban Greening*, 1-9.
- Chen, L., y Ng, E. (2011). Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade. *Cities*. No. 29, 118-125.
- Choi, Y., Suh, M., y Park, K. (2014). Assessment of Surface Urban Heat Islands over three megacities in east Asian using Land Surface Temperature data retrieved from COMS. *Remote Sensing*. No. 6, 5852-5867.
- Colunga, C., Cambrón Sandoval, V., Suzán, A., Guevara Escobar, A., y Luna Soria, H. (2015). The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Queretaro city, Mexico. *Atmósfera*. Vol. 28. No. 3, 205-218.
- CONAGUA. (1998). *Conjunto de datos vectoriales de las cuencas hidrológicas. Escala 1:250,000*. Obtenido de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONAGUA. (2013). *Boletín meteorológico. Organismo de Cuenca Frontera Sur. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Centro Hidrometeorológico Regional "Tuxtla Gutiérrez"*.
- CONAPO. (2010). *Proyecciones de la población de los municipios que componen las zonas metropolitanas, 2010-2030*. Obtenido de Consejo Nacional de Población:  
<https://www.google.com/search?q=proyecciones+de+la+poblacions+ciudad+de+aguascalientes&oq=proyecciones+de+la+poblacions+ciudad+de+agua+scalientes&aqs=chrome..69i57.12927j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8#>
- CONAPO. (2014). *Dinámica demográfica 1990-2010 y proyecciones de población 2010-2030. Aguascalientes*. Obtenido de Consejo Nacional de Población.
- 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. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol. 5. No. 5, 855-868.
- Dash, P., Götsche, F., y Fischer, O. (2002). Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends. *International Journal of Remote Sensign*. Vol. 23. No. 13, 2563-2594.
- ECMWF. (2020). *ERA5*. Obtenido de European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>
- EPA. (2020). *Air quality dispersion modeling-preferred and recommended models*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: [https://19january2017snapshot.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models\\_.html#blp](https://19january2017snapshot.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models_.html#blp)

- Fernández, F. (2016). La Climatología urbana en España en los últimos 30 años. En J. Olcina-Cantos, y A. Rico-Amorós, *Libro jubilar en homenaje al profesor Antonio Gil Olcina*. España: Instituto Interuniversitario de Geografía. Universidad de Alicante.
- Fonseca-Hernández, M., González-Mayor, Y., Fernández-Valdés, A., y Cuesta-Santos, O. (2015). Análisis de sensibilidad del campo de viento producido por el modelo de diagnóstico CALMET. *Ciencias de la Tierra y Espacio*. Vol. 16. No. 2, 176-188.
- García E., C. (1998). *Conjunto de datos vectoriales de climas (clasificación de Koppen, modificado por García)*. Escala 1:1,000,000. Obtenido de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- García-Cueto, O., Jáuregui-Ostos, E., Toudert, D., y Tejeda-Martínez, A. (2007). Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., México and its relationship with land use. *Atmósfera*. No. 20. Vol. 2, 111-131.
- Google Earth. (2019). *Google Earth*. Obtenido de <https://www.google.com/intl/es-419/earth/>
- Hernández-Garces, A., Jáuregui-Haza, U., González, J., Casares, J., y Álvarez, L. (2017). Aplicación del modelo de diagnóstico meteorológico CALMET. *Revista Cubana de Meteorología*. Vol 23. No. 1, 122-140.
- Howard, L. (1833). *The climate of London: deduced from meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis*. Picadilly, UK.: W. Phillips, George Yard, Lombard Street, sold also by J. and A. Arch, Cornhill; Baldwin, Cradock, and Joy, and W. Bent, Paternoster Row; and J. Hatchard.
- IMPLAN. (2015). *Programa de desarrollo urbano de la ciudad de Aguascalientes 2040*. Aguascalientes, Aguascalientes: Instituto Municipal de Planeación.
- INEGI. (2014). *Conjunto de datos vectoriales del Marco Geoestadístico Nacional*. Obtenido de Insitituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2016a). *Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1,000,000. Serie I*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2016b). *Tabulados de la encuesta intercensal, 2015*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INIFAP. (2019). *Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas INIFAP*. Obtenido de <http://clima.inifap.gob.mx/Inmysr/Estaciones/MapaEstaciones>
- Jáuregui , E., y Heres, M. (2008). El clima/bioclima de un parque periurbano de la Ciudad de México. *Invesigaciones geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. No. 67, 101-112.

- Jáuregui, E. (1997). Heat Island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*. Vol. 3. No. 22, 3821-3831.
- Jáuregui, E. G. (1992). Aspects of heat-island development in Guadalajara, Mexico. *Atmospheric Environment*. Part B. *Urban Atmosphere*, Vol. 26. No. 3, 391-396.
- Kotharkar, R., y Surawar, M. (2016). Land use, land cover and population density impact on the formation of Canopy Urban Heat Island through transverse Survey in the Nagpur urban area, India. *Journal of Urban Planning and Development*. Vol. 142. No. 1, 1-13.
- Lemus-Flores, S. (2016). *Isla de calor en la Ciudad de Puebla*. Tesis de licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. CdMx, México.
- Li, Z., Tang, B., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., . . . Sobrino, J. (2013b). Satellite-derive Land surface Temperature: current status and perspectives. *Remote Sensing of urban environment*. Vol. 131, 1437.
- Li, Z., Wu, H., Qiu, S., Sobrino, J., Wan, Z., Tang, B., y Yan, G. (2013a). Land Surface Emissivity retrieval from satellite data. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 34, 3084-3127.
- Luyando, E. (2016). *Efectos de las temperaturas y precipitaciones extremas en el bioclima humano de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México por Cambio Climático local y global*. Tesis de doctorado, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. CdMx, México.
- Naciones Unidas. (2018). *Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo*. Obtenido de Departamento de Asuntos Económicos y Sociales: <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html#:~:text=Actualmente%2C%20el%2055%20%25%20de%20las,el%20mundo%20vive%20en%20ciudades>.
- NASA. (2019). *Worldview Snapshots*. Obtenido de National Aeronautics and Space Administration: National Aeronautics and Space Administration)
- NASA. (2020). *Daily surface weather and climatological summaries*. Obtenido de Earthdata NASA: <https://daymet.ornl.gov/gridded/>
- NOAA. (2018). *Cold and Warm Episodes by Season*. Obtenido de National Oceanic and Atmospheric Administration and Climate Prediction Center: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- NOAA. (2019). *National Centers for Environmental Information. National Oceanic and Atmospheric Administration*. Obtenido de North American Mesoscale Forecast System: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/north-american-mesoscale-forecast-system-nam>

- Oke, T. (1995). The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects . *Wind climate in cities*, 81-107.
- Oke, T., Mills, G., Christen, A., y Voogt, J. (2017). *Urban Climates*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Orlanski, I. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 56. No. 5, 527-530.
- Pei, L., Peijun, D., Wen, C., y Junshi, X. (2009). Evaluation of urban heat environment using multialgorithm and multiscale images. *Urban Remote Sensing Joint Event*, 1-9.
- Pereyra-Castro, K. (2017). *Circulación local y su efecto en la calidad del aire: caso de estudio de la región central del estado de Veracruz*. Tesis de maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Rasul, A., Balzter, H., y Smith, C. (2016). Diurnal and seasonal variation of surface Urban Cool and Heat Island in the semi-arid city of Erbil, Iraq. *Climate*. Vol. 4. No. 42, 1-16.
- Rasul, A., Balzter, H., Smith, C., Remedios, J., Adama, B., Sorbino, J., . . . Weng, Q. (2017). A review of Remote Sensing of Urban Heat and Cool Islands. *Land*. Vol. 6. No. 38, 1-10.
- Rizwan, A., Dennis, Y., y Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environment Sciences*. Vol. 20, 120-128.
- Rodríguez-Mosqueda, T. (2017). *Bioclimatología e Infecciones Respiratorias Agudas en el estado de Aguascalientes, México*. Tesis de licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. CdMx, México.
- Romero Dávila, S., Morales Méndez, C., y Némiga, X. (2011). Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México. *Revista de Climatología*. Vol. 11, 1-10.
- Romo-Vázquez, A. (2012). *Evaluación funcional de la estructura económica espacial, en la ciudad de Aguascalientes*. Tesis de doctorado, Posgrado en Urbanismo, UNAM. México, D.F.
- Roth, M., Oke, T., y Emery, W. (1989). Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 10. No. 11, 1699-1720.
- Sangines, D. (2013). *Metodología de evaluación de la isla de calor urbana y su utilización para identificar problemáticas energéticas y de planificación urbana*. Zaragoza, España: Tesis de doctorado, Universidad de Zaragoza.
- Schwarz, N., Lautenbach, S., y Seppelt, R. (2011). Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities. *Remote Sensing of Environment*. No. 115, 3175-3186.

- Schwarz, N., Uwe, S., Franck, U., y Grossmann, K. (2012). Relationship of land surface and air temperature and its implications for quantifying urban heat island indicators- An applications for the city of Leipzig (Germany). *Ecological Indicators*. No. 18, 693-704.
- Scire, J., Robe, F., Fernau, M., y Yamartino, R. (2000). *A user's guide for the CALMET Meteorological Model*. Massachusetts, EUA: Earth Tech.
- SEGUOT;. (2014). *Programa de ordenación de la zona conurbana y metropolitana, 2013-2035*. Aguascalientes, Aguascalientes: Periodico oficial del estado de Aguascalientes, No. 47. Secretaria de Gestión Urbanística y Ordenamiento Territorial.
- SMN. (S/F). *Normales climatológicas por estado*. Obtenido de Servicio Meteorológico Nacional: <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=ags>
- Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., y Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Enviroment*. No. 90, 434-440.
- Sobrino, J., Oltra-Carrió, R., Soria, G., Jiménez-Muñoz, J., Franch, B., Hidalgo, V., . . . Paganini, M. (2013). Evaluation of the surface Urban Heat Island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 34. Nos. 9 y 10, 3177-3192.
- Soto-Díaz, A., y Pérez-Ruiz, E. (2015). Uso de percepción remota y sistemas de información geográfica para la determiación de la Isla de Calor Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI México-UACJ*, 1-7.
- SSP. (1981). *Síntesis geográfica de Aguascalientes*. México, D.F.: Secretaria de Programación y Presupuesto.
- Stull, R. (1988). *An introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers.
- Tomlinson, C., Chapman, L., Thornes, J., y Baker, C. (2011). Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: a review. *Meteorological Applications*. Vol. 18. No. 3, 296-306.
- USGS. (2018). *Earth Explorer. Using the USGS Landsat 8 Level-1 Data Product*. Obtenido de U.S. Geological Survey: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Voogt, J., y Oke, T. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of Environment*. No. 86, 370-384.
- Wang, Y., Hu, B., Myint, S., Feng, C., Chow, W., y Passy, P. (2018). Patterns of land change and their potential impacts on land surface temperature change in Yangon, Myanmar. *Science of the Total Environment*. No. 643, 738-750.

- Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. No. 64, 335-344.
- Yamashita, S. (1988). Some studies of Heat Island in Japan-with special emphasis of the climatological aspect. *Geographical Review of Japan*. Vol. 61. No. 1, 1-13.