

Sustentabilidad Climática Urbana a partir del Indicador de Islas de Calor en las Metrópolis del Estado de México. Caso: Zona Metropolitana de Toluca.

Diciembre 2021

CONTENIDO

Introducción	1
Objetivos de la investigación.....	2
Pertinencia de la investigación.....	3
METODOLOGÍA.....	4
Zona de estudio.....	4
Etapas metodológicas.....	8
Etapa metodológica I: Islas de calor superficial.....	9
Etapa metodológica II: Dimensión socioeconómica.....	11
Grupos vulnerables	13
Condiciones socioeconómicas	13
Acceso a servicios de salud.....	14
Índice socioeconómico	14
Etapa metodológica III: Zonas Socioclimáticas Adversas.....	14
RESULTADOS	15
Indicador de condiciones climáticas adversas por presencia de islas de calor..	15
Persistencia de islas de calor en la Zona Metropolitana de Toluca.....	22
Etapa II. Condiciones socioeconómicas adversas en la ZMT	24
Etapa metodológica III: Identificación de Zonas Socioclimáticas Adversas	27
Conclusiones.....	32
Bibliografía.....	33

Introducción

Las constantes modificaciones realizadas en la superficie terrestre para la adecuación y dotación de bienes y servicios de zonas de alta concentración demográfica ha permeado en impactos al ambiente en donde se generan las manchas urbanas. El crecimiento desmesurado de estas zonas ha conformado lo que hoy se conocen como metrópolis alrededor de todo el planeta, entendida esta como un conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan el límite del municipio que originalmente la contenía, incorporando como parte de sí misma o de su área de influencia directa a municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica o bien aquellos municipios que contienen una ciudad de un millón o más habitantes (SEDESOL et al., 2012).

La dispersión de las ciudades en el territorio plantea grandes desafíos para su gestión y sostenibilidad. Las ciudades más extensas requieren más carreteras, más tuberías, cables y más sistemas de transporte, el resultado ha sido la aparición de áreas urbanas de grandes dimensiones territoriales (ONU-HABITAT, 2012) y como es de suponerse esto conlleva modificaciones en el ambiente, dentro de las más notables se encuentran las modificaciones climáticas.

El clima regional cambia debido a la existencia de la propia ciudad, generando la aparición de un clima local denominado clima urbano. El principal indicador que demuestra la existencia de variabilidad climática en un espacio urbano, son las islas de calor (Oke 1987; López et al. 1993; Alonso et al., 2003), siendo la temperatura el elemento que condiciona la existencia de estas y la vegetación y suelo los factores que más influyen.

Las islas de calor son espacios urbanos con una temperatura mayor que las áreas periurbanas o rurales adyacentes a estos e influyen en el territorio donde se desarrollan, impactando en cuatro entornos principales: las condiciones climáticas del ambiente, la biodiversidad, la salud humana y la economía (Voogt, 2008; EPA, 2008).

Por lo anterior, es prioritario que las áreas urbanas, conozcan el diagnóstico que guardan respecto al fenómeno islas de calor, con la finalidad de identificar zonas prioritarias de atención con base en la población afectada, sobre todo los sectores más vulnerables. Con base en la caracterización de dichas zonas, se posibilita el enfoque puntual de acciones de política pública que mitiguen los impactos negativos en el ambiente, la sociedad y la economía.

Se genera el estudio a partir del índice de sustentabilidad climática urbana, el cual es una propuesta para evaluar las condiciones de clima urbano y socioeconómicas que presentan las metrópolis para hacer frente a los impactos del cambio climático, es decir, a mayores valores del índice, mayor capacidad de mitigación.

Objetivos de la investigación

General:

Identificar la sustentabilidad climática urbana que poseen las áreas metropolitanas del Estado de México, con base en el indicador de islas de calor, con la finalidad de priorizar zonas de atención para acciones de mitigación contra los impactos del cambio climático local.

Específicos:

- Generar la búsqueda y selección de imágenes satelitales Landsat 8, con la finalidad de preprocesar las escenas para su posterior análisis.
- Procesar las imágenes satelitales para derivar la temperatura superficial, la cual permita identificar la presencia de islas de calor superficial en las Zonas Metropolitanas del Estado de México.
- Analizar el comportamiento y distribución espacial de las islas de calor, con la finalidad de generar el mapa de persistencia del clima urbano y con ello identificar las zonas climáticas adversas.
- Categorizar las condiciones socioeconómicas que existen en las Zonas Metropolitanas del Estado de México, con el propósito de identificar las zonas socioclimáticas adversas.

- Analizar con base en el análisis espacial el grado de correlación estadística y espacial, los indicadores de persistencia de islas de calor y socioeconómicos, para generar un indicador sintético que permita identificar y categorizar zonas socio-climáticas adversas y con ello el grado de sustentabilidad climática urbana.

Pertinencia de la investigación

El proyecto de investigación se enmarca dentro de la línea de investigación del desarrollo urbano sustentable por lo que fortalecerá dos sectores prioritarios en el país. Dentro del primero, la Agenda 2030 contempla los objetivos de desarrollo sostenible, los cuales fueron redactados ante la creciente desigualdad social y la degradación ambiental. Los desafíos para un desarrollo ambiental sostenible se concentran cada vez más en las metrópolis. Se plantean 17 acciones dirigidas, entre ellas lograr la consolidación de ciudades sostenibles. México se encuentra en una de las zonas más urbanizadas del planeta, según datos del Banco Mundial (2015), el 79% de los habitantes en el país reside en una ciudad y el Estado de México posee al 86.09% de sus habitantes en espacios urbanos. Por lo anterior, México es uno de los 193 países comprometidos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, dentro de los cuales, se encuentran los cambios climáticos, por lo que los esfuerzos se centran en crear espacios resilientes a las amenazas generadas.

Las ciudades han crecido y con ellas también las problemáticas ambientales, incluidas las relacionadas con el clima. El clima urbano se hace presente e influyen negativamente en cuatro entornos principales: las condiciones climáticas del ambiente, la biodiversidad, la salud humana y la economía generando discomfort climático, consolidación de plumas de contaminación, pérdida de la biodiversidad, enfermedades respiratorias y cardiovasculares y aumento en el costo de vida. En el país, de las 74 zonas metropolitanas existente solo 10 cuentan con estudios de clima urbano y dentro del Estado de México, solo se tiene cubierta a la metrópoli de Toluca, por lo que la de Tianguistenco y Cuautitlán-Texcoco carecen de dicho análisis.

Las islas de calor consolidan los efectos del cambio climático global, se ha demostrado que una ciudad que presente los efectos de la isla de calor aumentará los costos de mitigación hasta en un 100%. El Estado de México requiere atender la problemática de las islas de calor existentes en sus metrópolis para lograr la sostenibilidad climática. Lo anterior permitirá que la lucha contra el cambio climático proyecte mejores escenarios para un futuro cercano.

El presente proyecto de investigación permite avanzar en la investigación del incipiente tema del clima urbano en el Estado de México y en el país, además será base para identificar sectores del territorio que son focos de atención para el equilibrio climático, lo que resultará en políticas públicas focalizadas con base en fundamentos científicos.

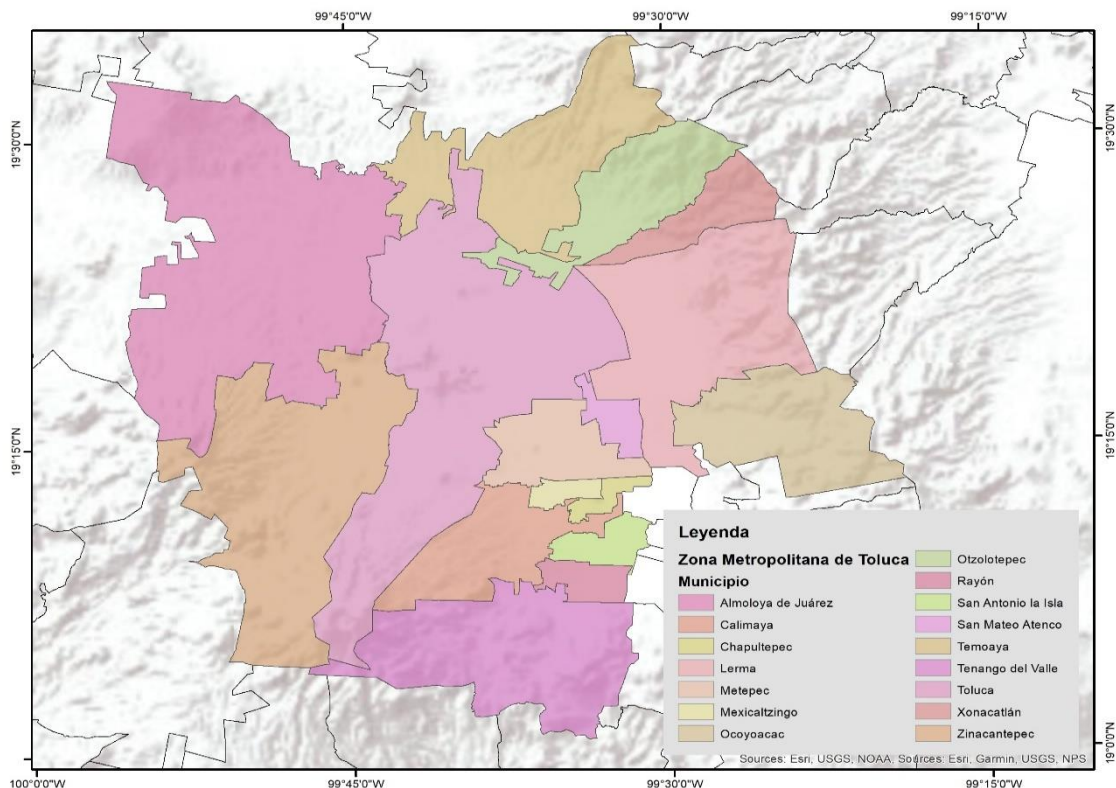
METODOLOGÍA

Zona de estudio

Las zonas metropolitanas se convierten en focos de atención para el análisis del clima local debido a que la ciudad modifica los patrones de temperatura regional. Así, el clima urbano se hace presente a partir de su principal indicador que es la isla de calor urbana. De acuerdo con Oke y Hanell (1970) el tamaño de la población incide en la velocidad límite a partir de la cual se puede desvanecer una isla de calor, aunado con los factores condicionantes que puedan prevalecer en cada una de las urbes, lo que determinará la intensidad que se puede alcanzar.

El Estado de México cuenta con tres zonas metropolitanas, de las cuales dos se encuentran en la lista de las que encabezan las de más alto número de población. Una de ellas es la Zona Metropolitana de Toluca, la cual está delimitada geográficamente por las coordenadas 19°34'58"N, 99°31'49"W y 19°04'29"N, 99°50'47"W. De acuerdo con la delimitación propuesta por SEDESOL *et al.*, (2018), la zona está integrada por 16 municipios, los cuales en conjunto poseen una extensión territorial de 2 411.7 km². La zona urbana ocupa una extensión de 402.7km² del total municipal. De acuerdo con el Censo General de Población y Vivienda la ZMT cuenta con 2,353,924 habitantes (INEGI, 2020).

Ubicación geográfica de la Zona Metropolitana de Toluca



Municipios de la ZMT

Municipio	Superficie km²	Población al 2020
Almoloya de Juárez	480.2	174,587
Calimaya	103.0	68,489
Chapultepec	12.0	12,772
Lerma	230.8	170,327
Metepec	67.4	242,307
Mexicaltzingo	11.3	13,807
Ocoyoacac	139.3	72,103
Otzolotepec	112.3	88,783
Rayón	23.0	15,972
San Antonio la Isla	25.3	31,962
San Mateo Atenco	18.9	97,418
Temoaya	188.1	105,766
Tenango del Valle	208.5	90,518
Toluca	428.1	910,608
Xonacatlán	53.5	54,633
Zinacantepec	310.0	203,872
TOTAL	2 411.7	2,353,924

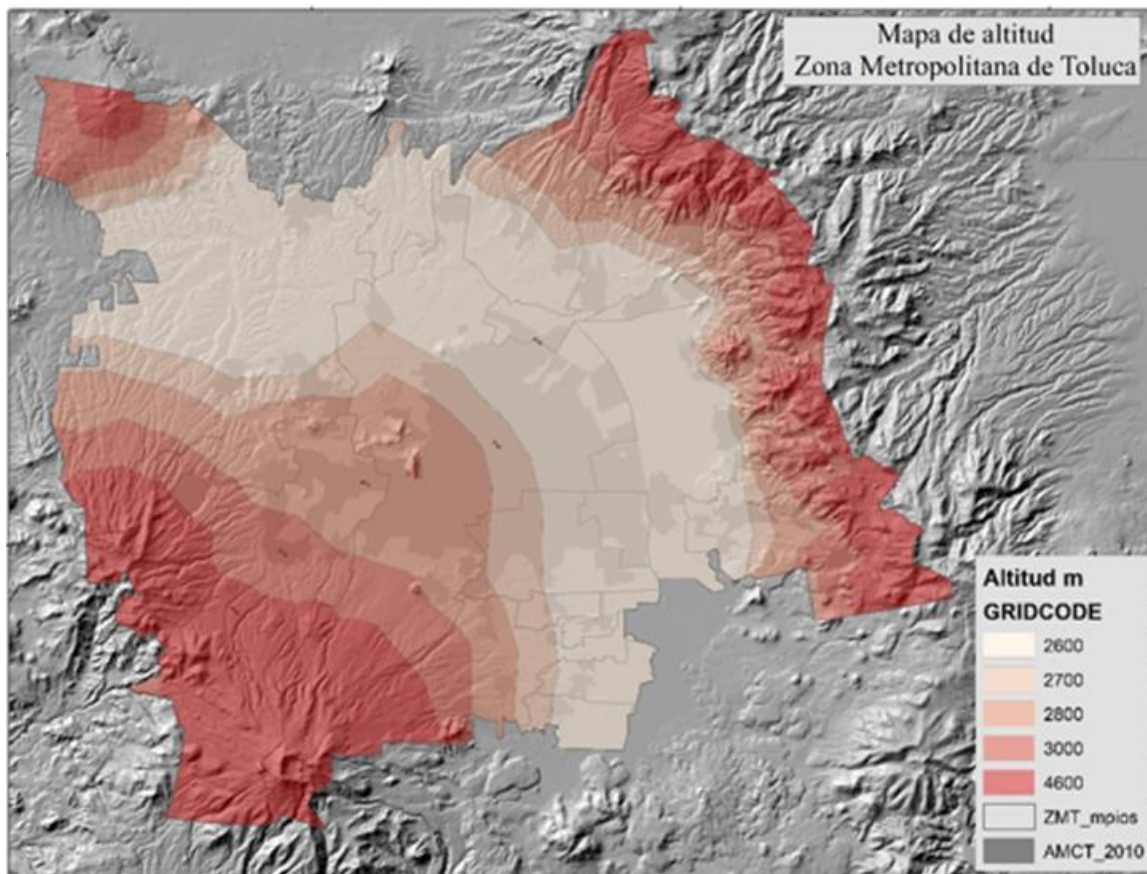
Elaboración propia con base en SEDESOL, CONAPO e INEGI (2018) e INEGI, (2020)

Las condiciones socioeconómicas, muestran que en el 2015 la zona tenía una tasa de crecimiento media anual de 1.9% y una densidad de población de 64.4 hab/ha según datos de SEDESOL et al. (2018). La ciudad consolidó su crecimiento gracias al corredor industrial Toluca-Lerma, posteriormente se diversificó hacia el sector terciario logrando extenderse a los municipios periféricos (GEM y COESPO, 2012), por lo que por función, es una ciudad industrial y de servicios.

Respecto al medio físico, la metrópoli de Toluca se encuentra a una altitud promedio de 2800 msnm, lo que influye en condiciones meteorológicas del lugar. Tiene un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, una temperatura media anual de 12.0°C y una precipitación media anual de 760mm presentándose entre los meses de mayo a octubre.

Los municipios que integran a la zona metropolitana forman parte de Sistema Volcánico Transversal. El relieve se caracteriza por la Sierra de las Cruces al noroeste de la ciudad y el volcán Nevado de Toluca al sur, teniendo altitudes por encima de los 3000 msnm; la metrópoli se ubica en un valle (Valle de Toluca). La vegetación que predomina en el valle son pastizales, además de zonas agrícolas de temporal y de riego, por su parte, las zonas de mayor altitud presentan bosques de coníferas.

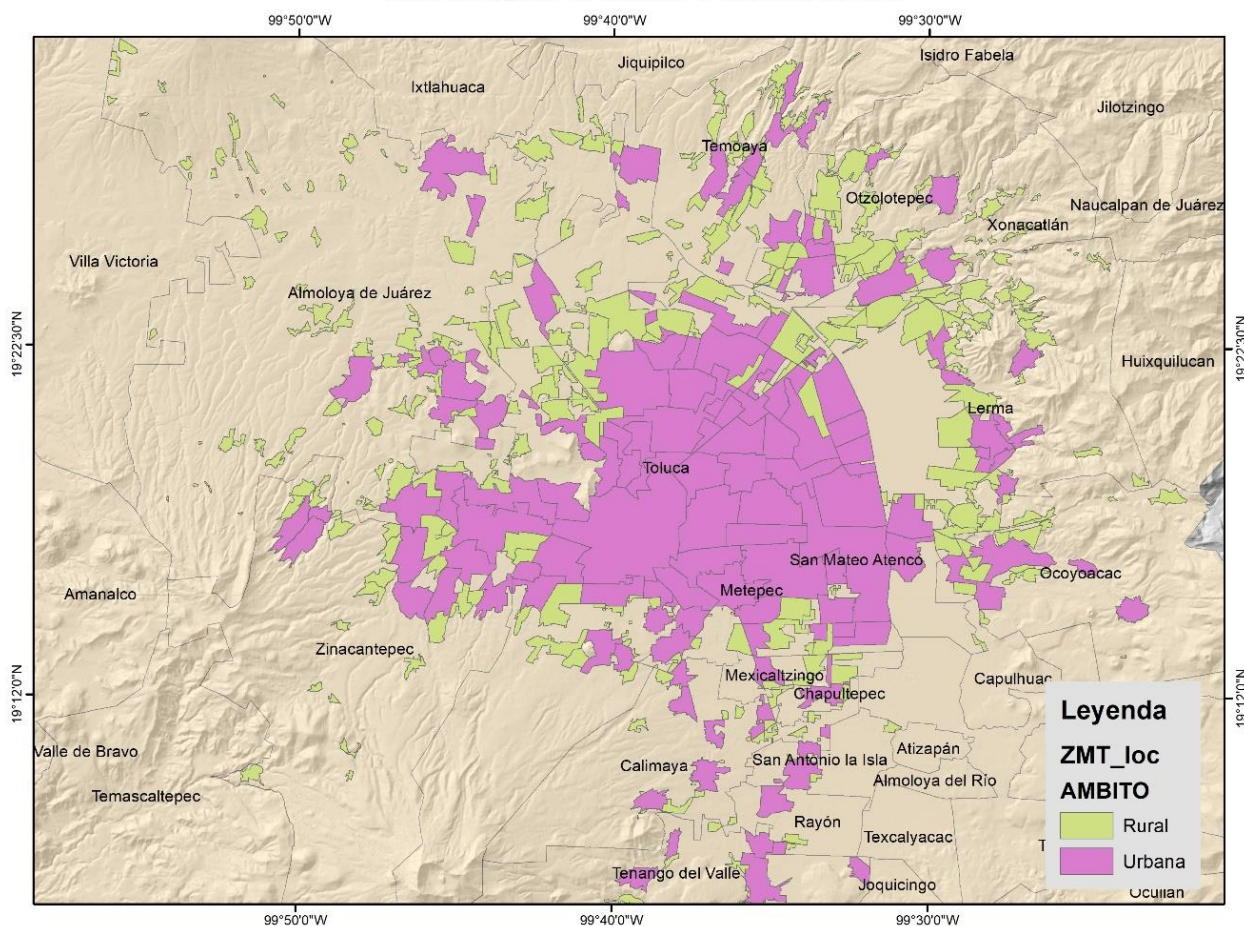
Altitud de la Zona Metropolitana de Toluca



Unidad de análisis de estudio

La unidad de análisis para el cálculo de los indicadores es la localidad, la cual es generada por el INEGI (2016). De acuerdo con el INEGI, una población se considera rural cuando tiene menos de 2,500 habitantes, mientras que la urbana es aquella donde viven más de 2,500 personas. Para la Zona Metropolitana de Toluca se cuenta con 490 localidades urbanas y rurales ameznadas. La base cartográfica utilizada corresponde al Marco Geoestadístico del INEGI del 2019. La categorización de áreas para la determinación de zonas socioclimáticas adversas estará dada por la unidad de análisis antes mencionada.

LOCALIDADES URBANAS Y RURALES. ZMT



Etapas metodológicas

El diseño metodológico se elaboró a partir de los objetivos específicos planteados, se trazaron tres etapas metodológicas, las cuales abarcan los escenarios referentes al análisis del clima urbano (islas de calor), de aspectos socioeconómicos y finalmente a la identificación de las zonas socioclimáticas adversas para determinar el grado de sustentabilidad climática urbana que posee la ZMT.

Diseño de etapas metodológicas



Las etapas metodológicas se relacionan con base en el fundamento teórico que las sustentan, así como en los objetivos en las que se incluyen. Se detallan a profundidad en los siguientes apartados.

Etapla metodológica I: Islas de calor superficial

Para la variable temperatura, se procesaron imágenes de satélite del sensor Landsat 8 OLI (path 26, row 47), con la finalidad de derivar la temperatura superficial. Las imágenes satelitales fueron obtenidas del servidor del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), pertenecen al nivel 1T, por lo que son imágenes digitales ortorectificadas, pues tienen correcciones geométricas y radiométricas (USGS, 2015).

Para la derivación de la temperatura se utilizaron las bandas del infrarrojo térmico entre 10 y 12 μm (banda 10 y 11). La metodología utilizada se basó en la descrita en Rivera, *et al.*, (2017). Se trabajaron seis escenas, cuyas características se encuentran descritas en la siguiente tabla; en ella se pueden identificar que las escenas corresponden a la estación de verano. De acuerdo con García-Cueto *et al.*, (2007), el mes que más representa a la estación de verano para el hemisferio norte, es Julio.

Datos básicos de las escenas Landsat 8 OLI

Identificador	Año	Mes/día	% de nubosidad
LC08_L1TP_026047_20140726_20170304_01_T1	2014	07/26	0.76
LC08_L1TP_026047_20150713_20170226_01_T1	2015	07/13	2.14
LC08_L1TP_026047_20160715_20170221_01_T1	2016	07/15	11.95
LC08_L1TP_026047_20180721_20180731_01_T1	2018	07/21	2.24
LC08_L1TP_026047_20190708_20190719_01_T1	2019	07/08	9.16

La nubosidad es un factor clave para la identificación de la temperatura superficial por lo que a menor porcentaje de cobertura de nubosidad, el cálculo es más cercano a la realidad. A pesar de que la escena del 2016 presenta mayor porcentaje de nubosidad, esa nubosidad no interfiere en la Zona Metropolitana de Toluca, por lo que en general, las escenas presentan bajo porcentaje de cobertura de nubosidad, por tanto son apropiadas para derivar la temperatura superficial.

Para analizar la isla de calor se requiere medir su intensidad, la cual se define como la diferencia entre la temperatura máxima del entorno urbano y la rural, para condiciones estables de la atmósfera y para después de la puesta del sol. Con base en el archivo raster de temperatura superficial generado y tomando en cuenta la fórmula propuesta por Oke (1987) y Montávez et al. (2000), misma que integra todas las condiciones meteorológicas en donde exista esa diferencia máxima, se utilizó la siguiente ecuación.

$$\Delta T = T_U - T_R$$

Donde:

ΔT , es la intensidad de la isla de calor,

T_U , es la temperatura urbana y

T_R es la temperatura rural o periférica

Tomando en cuenta datos de temperatura atmosférica proporcionada por las estaciones meteorológicas existentes en el territorio, se identificó el valor más bajo para cada año analizado y en la misma fecha de la escena, y con base en ese punto, se obtuvo el valor de temperatura superficial. Utilizando la calculadora raster, se realizó la resta para todos los

valores de la imagen con la finalidad de obtener la intensidad de las islas de calor que se presentan en el espacio.

Valor base de temperatura para cálculo de intensidad de isla de calor

Estación meteorológica	Año	Temperatura superficial °C
<i>San Cristóbal Huichochitlán</i>	2014	28.28
	2015	24.78
	2016	25.38
	2018	28.11
	2019	27.12

Los valores de intensidad de isla de calor se clasificaron de acuerdo con Fernández (1995) en: Débil (0-2°C), Moderada (2.1- 4°C), Fuerte (4.1- 6°C) y Muy fuerte (> 6°C). Los valores por debajo de cero se clasifican como islas de calor negativas.

Para identificar la persistencia de la isla de calor, se generó un layer stacking (el cual es un proceso que permite apilar varias escenas en un solo archivo), con todas las escenas trabajadas. Con base en el archivo resultante se hizo una reducción de dimensiones a partir del método de análisis de componentes principales (ACP) y se eligió el componente que tuviera la mayor varianza explicada para que representara el comportamiento temporal de la isla de calor en la zona de estudio.

El proceso se sintetiza en los siguientes pasos:

- A partir de la matriz de varianza-covarianza de las bandas de la imagen original, se extraen los autovalores para cada uno de los componentes.
- Los autovalores expresan la longitud de los nuevos componentes.
- El autovalor va disminuyendo progresivamente del primero al último componente.
- La varianza total explicada por cada componente se calcula como la proporción de su autovalor frente a la suma de todos los autovalores.

Etapas metodológicas II: Dimensión socioeconómica

Respecto a las condiciones socioeconómicas de la población, las variables consideradas se eligieron de acuerdo a los sectores de población que pueden ser vulnerables al clima urbano.

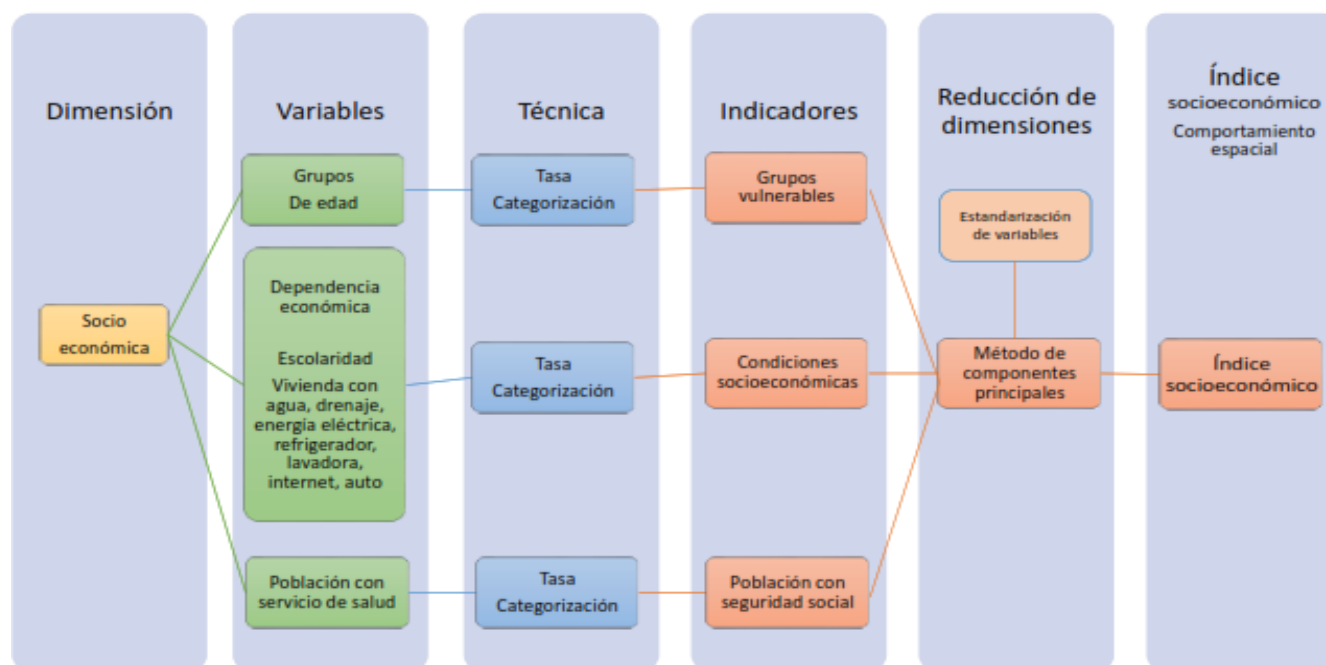
Con base en esos sectores, se eligieron las variables que brindaron información semejante y que permitieron crear el índice socioeconómico. Se describe la operacionalización de variables y la descripción simplificada del diseño metodológico.

Operacionalización de variables de la dimensión socioeconómica.

ETAPA METODOLÓGICA	VARIABLES	UNIDAD DE MEDIDA	TÉCNICA DE INVESTIGACIÓN	INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN	FUENTE
<i>Socioeconómica</i>	Grupos vulnerables	Años	Categorización de datos	ITER	INEGI
	Población con servicio de salud	Porcentaje	Categorización de datos	ITER	INEGI
	Escolaridad	Años de estudio	Categorización de datos	ITER	INEGI
	Dependencia económica	Pob total/ PEA ocupada	Categorización de datos	ITER	INEGI
	Viviendas con agua	Total de viviendas con agua por localidad	Categorización de datos	ITER	INEGI
	Viviendas con drenaje	Total de viviendas con drenaje por localidad	Categorización de datos	ITER	INEGI
	Viviendas con energía eléctrica	Total de viviendas con energía eléctrica por localidad	Categorización de datos	ITER	INEGI
	Viviendas con refrigerador	Total de viviendas con refrigerador por localidad	Categorización de datos	ITER	INEGI
	Viviendas con lavadora	Total de viviendas con lavadora por localidad	Categorización de datos	ITER	INEGI
	Viviendas con internet	Total de viviendas con internet por localidad	Categorización de datos	ITER	INEGI
	Viviendas con automóvil	Total de viviendas con automóvil por localidad	Categorización de datos	ITER	INEGI

Fuente: elaboración propia

Diagrama metodológico de la dimensión socioeconómica



Fuente: elaboración propia

Grupos vulnerables

Los grupos vulnerables representan un sector de la población de mayor riesgo a los impactos negativos del clima urbano, por lo que es importante identificar su distribución en el espacio. Para generar el valor cuantitativo por localidad, se trabajó con el ITER 2020, del Censo General de Población y Vivienda del mismo año.

Se consideran grupos vulnerables los infantes y los adultos mayores, por lo que se seleccionaron los grupos de edad de 0 a 2, 3 a 5, 6 a 11, que representan a los infantes y 60 y más, que integran a los adultos mayores. Con base en la suma de esos sectores de población, se calculó la tasa por localidad.

Condiciones socioeconómicas

Para las condiciones socioeconómicas de la población de la Zona Metropolitana de Toluca, el dato de nivel socioeconómico es el que se ha usado preponderantemente, sin embargo, no se tiene al alcance por lo que se generó un indicador que se aproximara a conocer la condición socioeconómica de la población. Las variables que se integraron, refieren a

educación, bienes y servicios en el hogar y dependencia económica. Para cada variable se calculó la tasa por localidad.

Acceso a servicios de salud

El contar con acceso a servicios de salud, asegura la atención prioritaria en caso de presentar condiciones negativas climáticas en el lugar donde se viva, lo cual permite hacer frente a las enfermedades que de esa situación se generen. Se calculó la tasa de población con acceso a servicios de salud por localidad.

Índice socioeconómico

Para realizar el índice socioeconómico, se procedió a estandarizar las variables con base en la varianza. A partir de los valores calculados, se generó el índice utilizando como método de reducción de dimensiones el análisis de componentes principales (ACP).

El archivo final que muestra las zonas socioeconómicas adversas se categorizó de acuerdo a la intensidad con la que se presenta en el territorio de la Zona Metropolitana de Toluca en: muy alta, alta, media, baja y muy baja.

Etapametodológica III: Zonas Socioclimáticas Adversas

Para la determinación de sustentabilidad climática urbana se trabajó un análisis espacial que mostrara la persistencia de las condiciones negativas del clima urbano y de las condiciones adversas respecto al contexto socioeconómico, denominando a dicha áreas “Zonas Socioclimáticas Adversas”.

Para identificar espacialmente las zonas adversas, se realizó una correlación espacial estadísticamente significativa para lo cual se calculó el Índice de Morán bivariado, el cual permite conocer la forma en la que se comporta un fenómeno a través del espacio geográfico pero considerando la afectación que genera la presencia de una segunda variable.

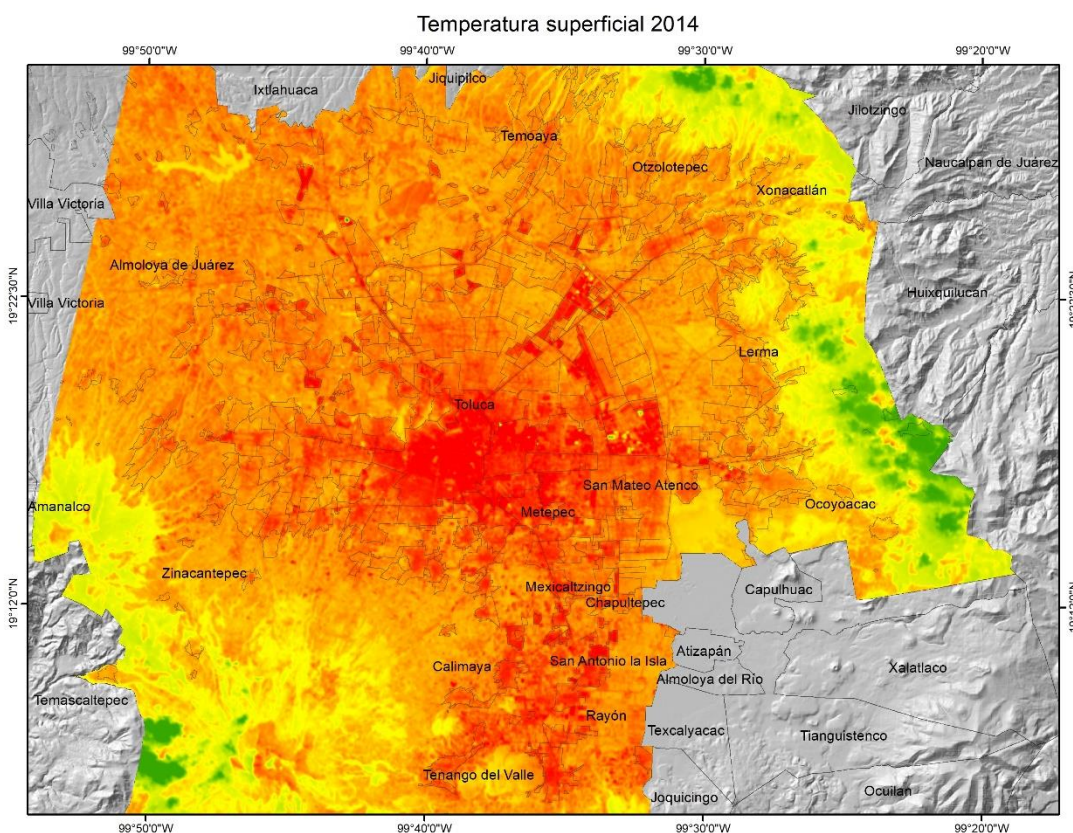
El Índice de Morán bivariado posibilitó identificar los clústeres en el territorio con base en las zonas climáticas y socioeconómicas adversas (es decir, que presenten valores altos en el espacio). El índice permitió evaluar si el patrón detectado está agrupado, disperso o es aleatorio. Se usó el valor P para determinar la significancia de dicho índice.

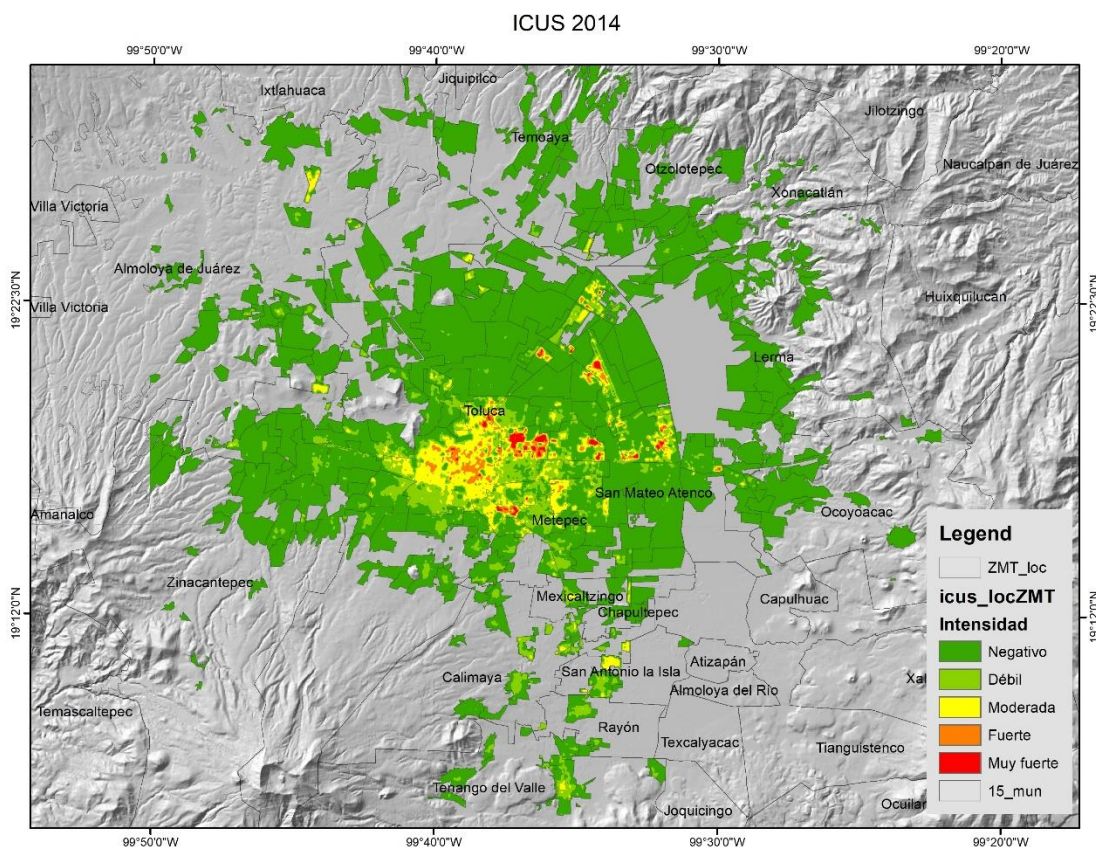
RESULTADOS

Indicador de condiciones climáticas adversas por presencia de islas de calor

Con base en el análisis realizado, se presenta el comportamiento temporal y espacial de las islas de calor existentes en la Zona Metropolitana de Toluca. Se describen en primera instancia por cada año analizado y posteriormente, por persistencia en el territorio.

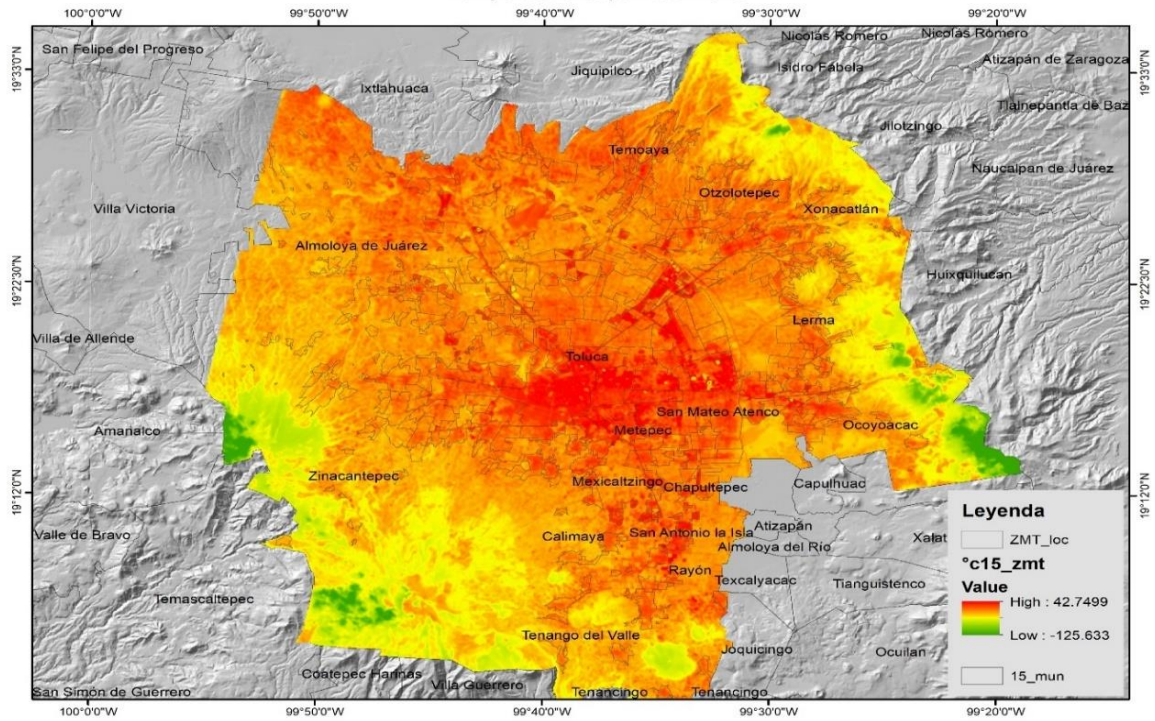
Para el 2014, la temperatura superficial alta se concentra en la zona urbana, las temperaturas más bajas se presentan en las zonas periféricas. Se alcanzan valores de 47°C de temperatura superficial, sin embargo, al hacer el cálculo de las islas de calor, los valores máximos que se presentan, se encuentran en 19°C, es decir, existen zonas dentro del área de estudio que poseen islas de calor muy fuertes. Se localizan sobre todo en territorio del municipio de Toluca, Metepec y Lerma. Las ICUs fuertes y muy fuertes se concentran en la zona centro y en el corredor industrial Tollocan. Existe un sector desagrupado en la zona de aeropuerto.



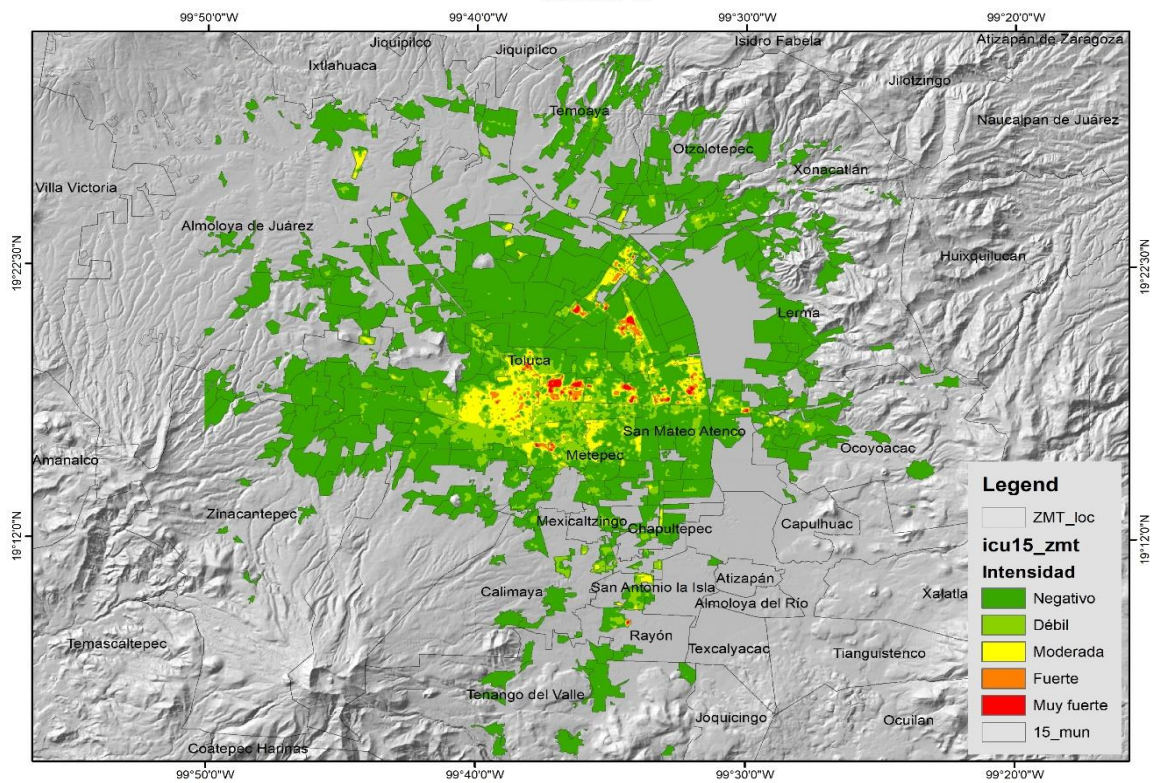


Para el año de 2015, los valores máximos de temperatura superficial se situaron por encima de los 42°C, localizándose nuevamente al interior de la metrópoli. Los cálculos para la intensidad de la isla de calor muestran un comportamiento parecido al 2014. Los valores de intensidad más altos alcanzados se encuentran en 17.96°C y se ubican en las localidades de Toluca, Santa Ana Tlapaltitlán, Santa María Totoltepec y Lerma de Villada, en las cuales se localiza el corredor industrial Tollocan.

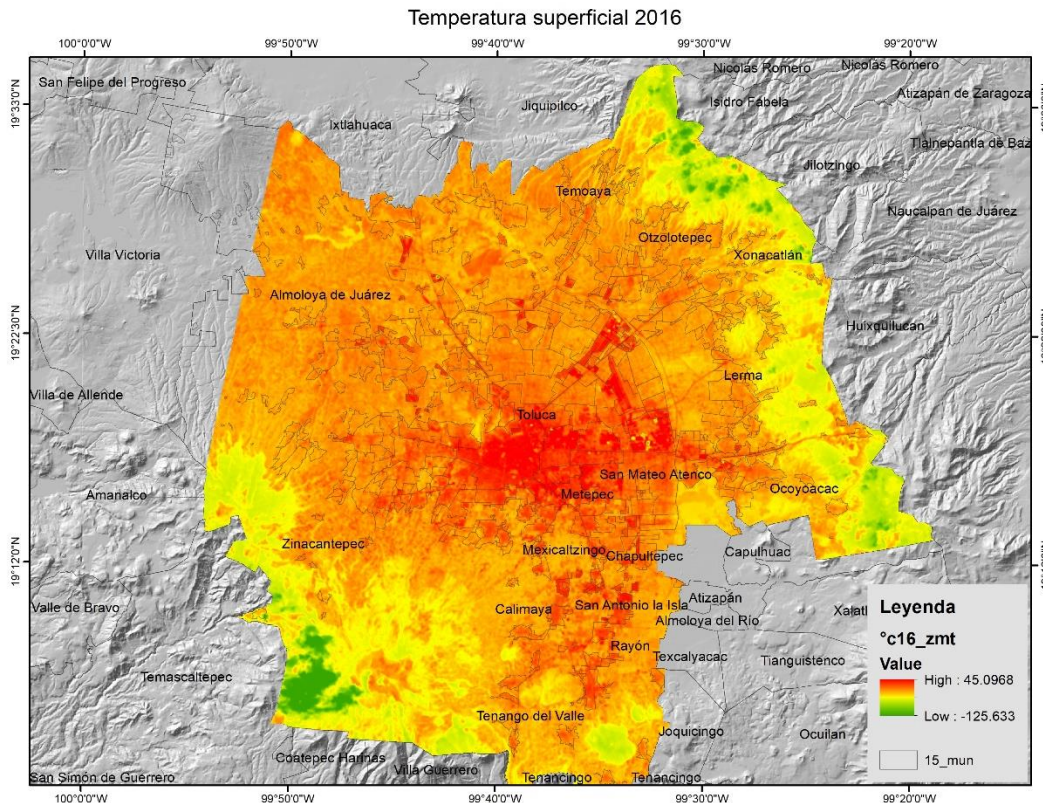
Temperatura superficial 2015



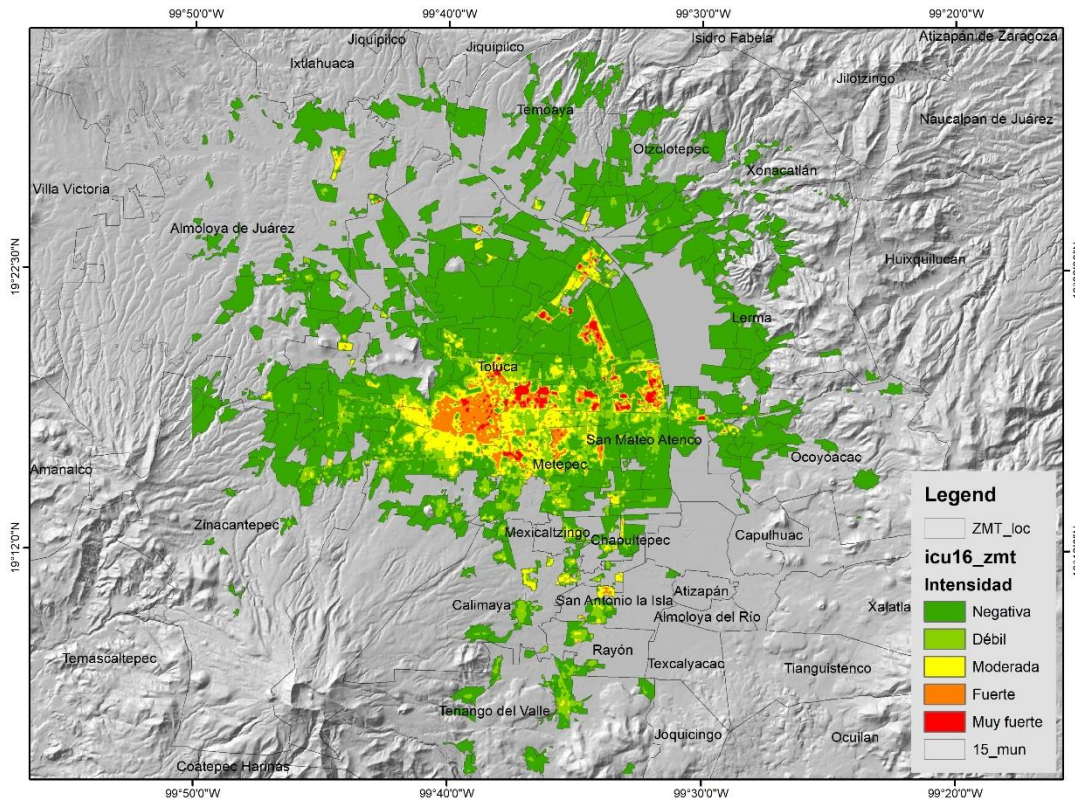
ICUs 2015



El año 2016 aumentó 2°C respecto al 2015, en cuanto a su temperatura superficial máxima alcanzada alcanzando los 45°C. Se muestra un comportamiento más intenso para el interior de la ciudad. Las islas de calor calculadas alcanzan valores de fuertes a muy fuertes, teniendo como máxima intensidad 19.71°C de diferencia entre la zona urbana y la periurbana o rural. Dichas intensidades siguen el patrón de los años anteriores, sin embargo, aumenta en superficie la isla de calor fuerte y muy fuerte, respecto al año anterior.

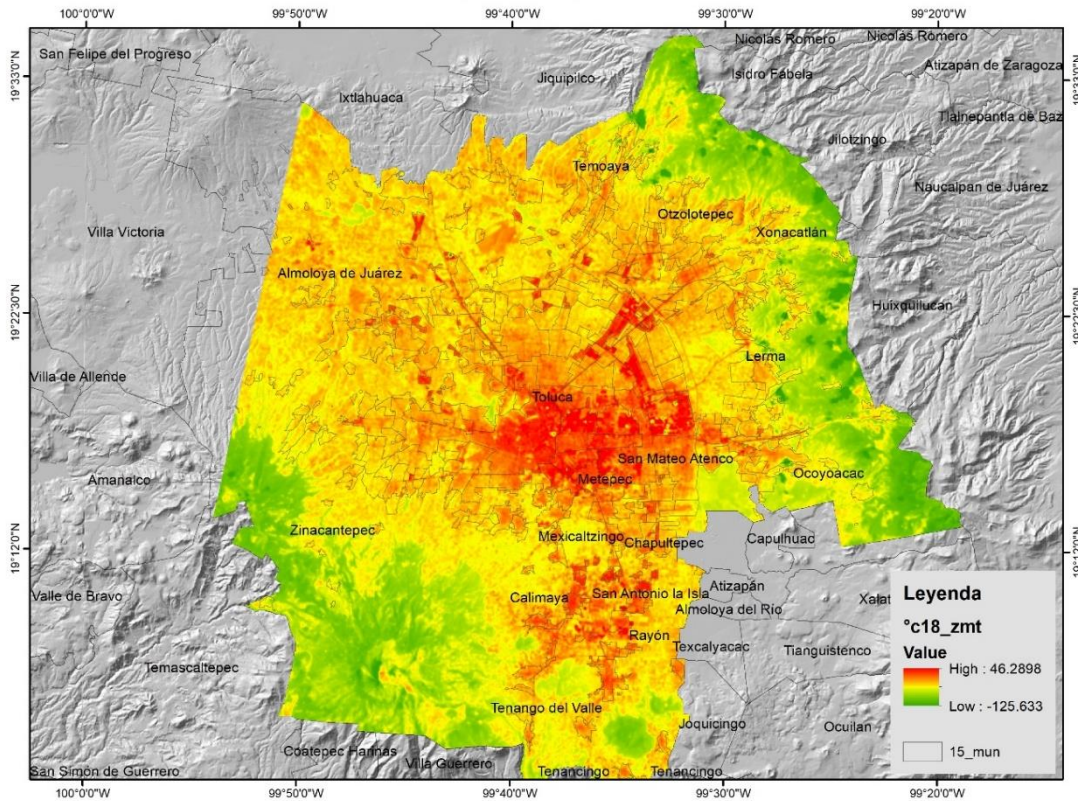


ICUs 2016

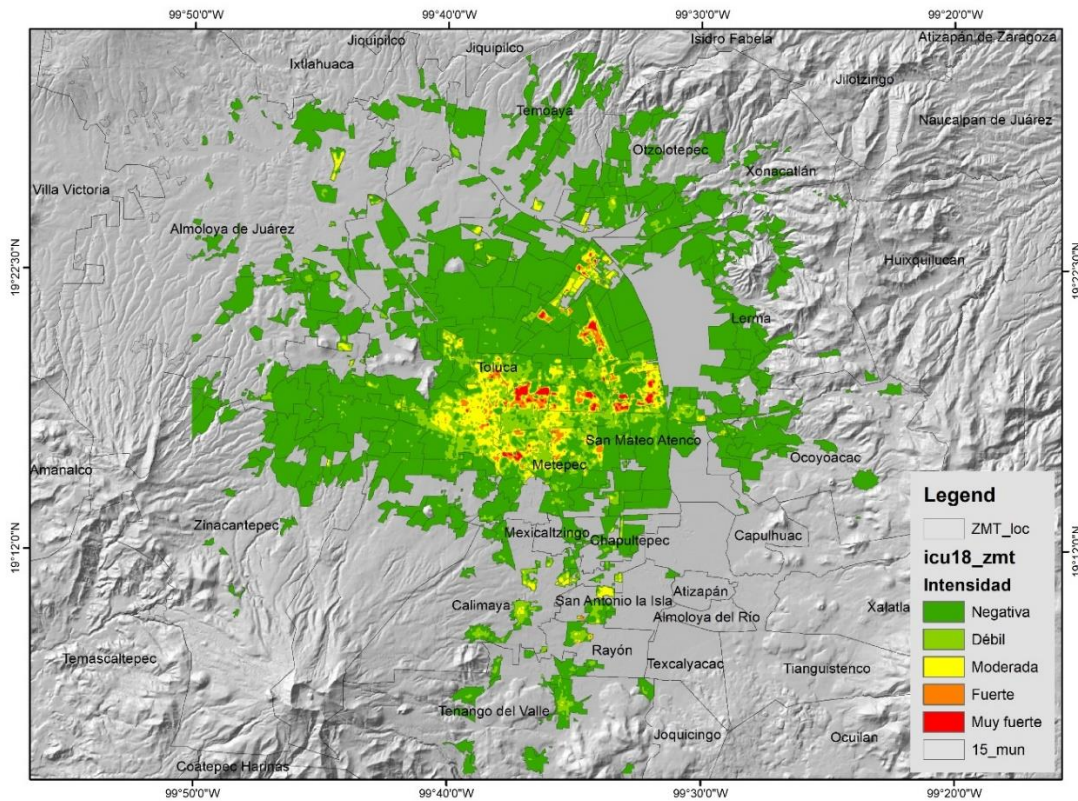


Para el año 2017 no se tenían disponibles imágenes que cumplieran con las especificaciones técnicas necesarias, por lo cual no hay datos disponibles. Respecto al 2018, el comportamiento de la temperatura superficial se destaca con mayor facilidad entre el área urbana y periurbana. Los valores máximos alcanzados en superficie oscilan en los 46°C. Para la isla de calor de este año, disminuyó la superficie de la intensidad fuerte y aumentó la de la moderada. Respecto a la isla de calor muy fuerte, el patrón de distribución espacial continúa con el mismo comportamiento que los años anteriores. Se focaliza en el corredor industrial Tolloca, en la zona del aeropuerto y en el área comercial de Metepec. La intensidad máxima alcanzada es de 18.7°C.

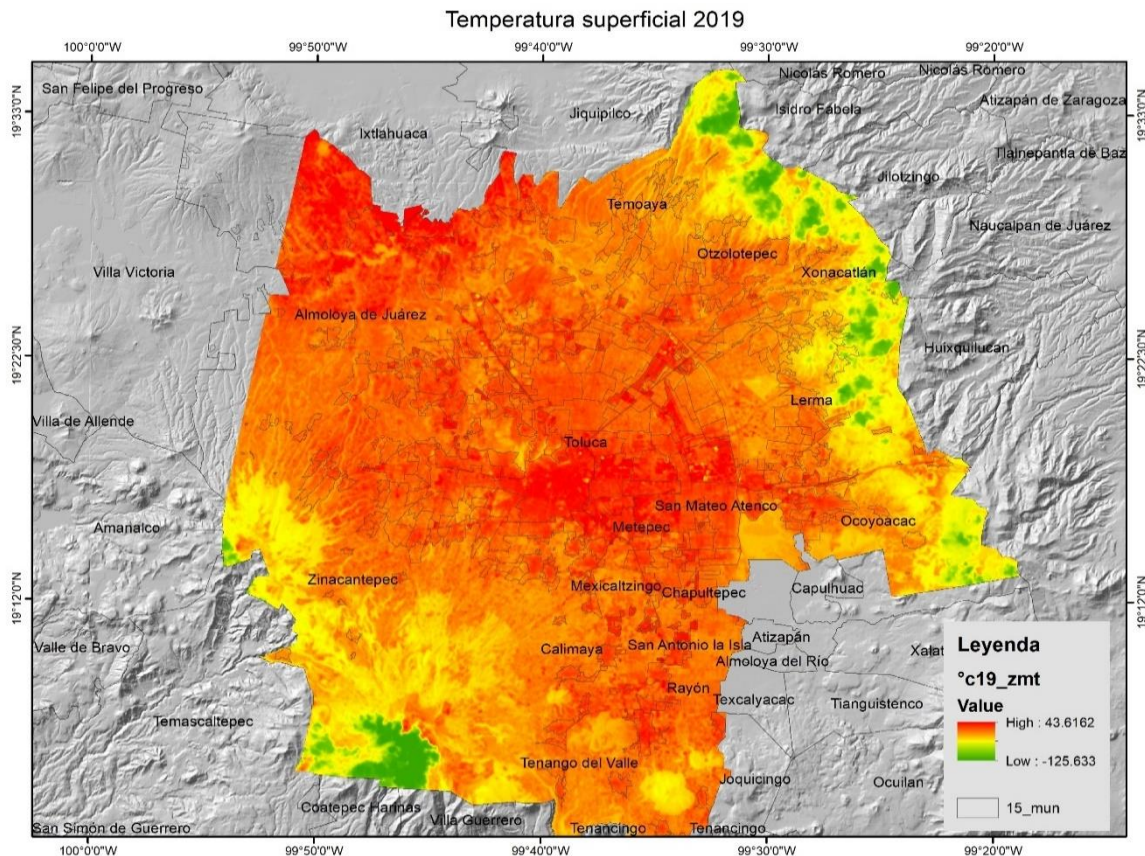
Temperatura superficial 2018

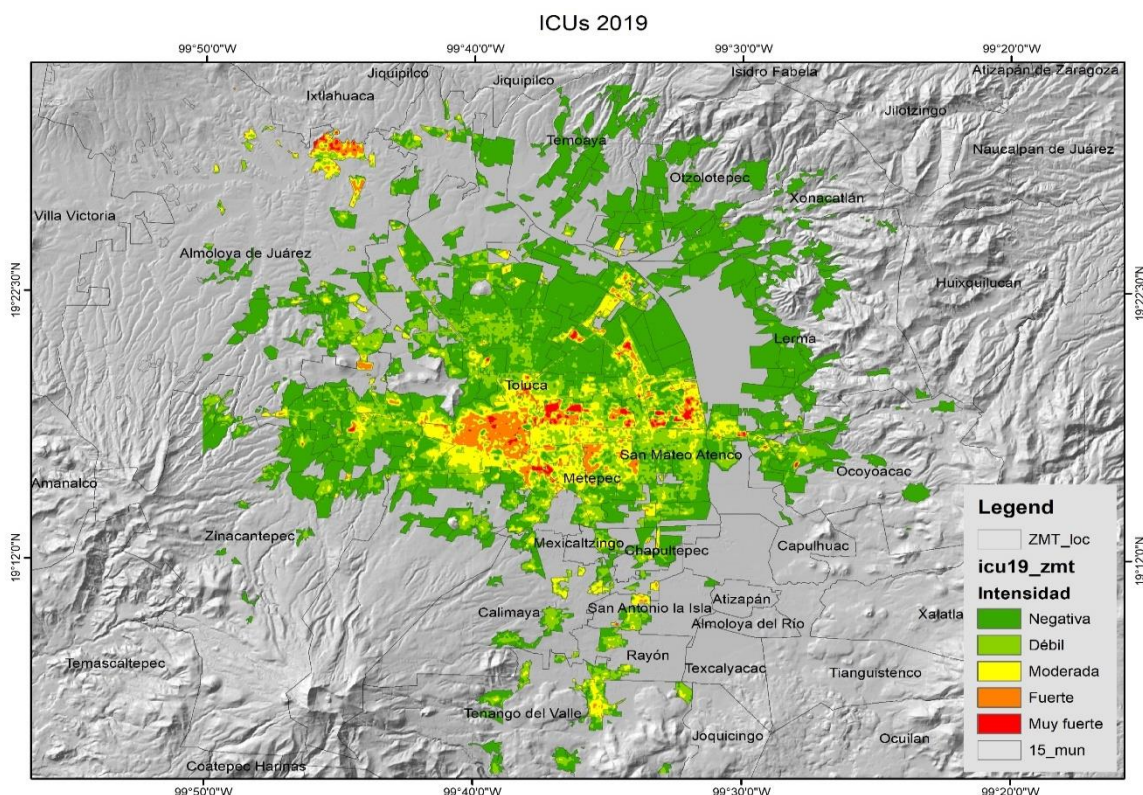


ICUs 2018



Finalmente, para el año de 2019 la temperatura superficial calculada se encuentra en máximos de 43.61°C . La diferencia entre ambientes urbanos y periurbanos no es tan marcada como en otros años, las temperaturas mínimas se localizan en las zonas montañosas que se encuentran alrededor del valle. La isla de calor alcanza intensidades máximas de 16.6°C . El comportamiento espacial continúa con el mismo patrón que ha tenido a lo largo de los años descritos con anterioridad. Las zonas afectadas por presencia de islas de calor con intensidades fuertes y muy fuertes se localizan nuevamente con mayor presencia en la zona centro de Toluca, corredor industria Tolloca, zona industrial de Aeropuerto, y las localidades de San Francisco Coaxusco, Metepec y San Salvador Tizatlalli.

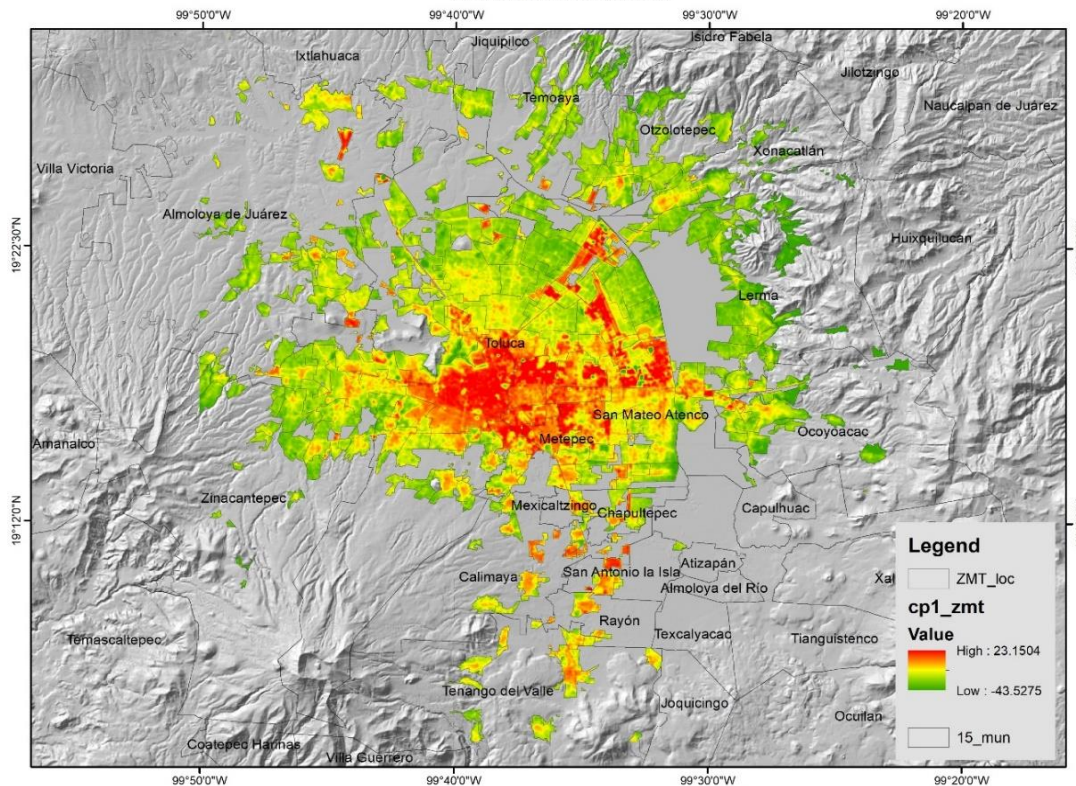




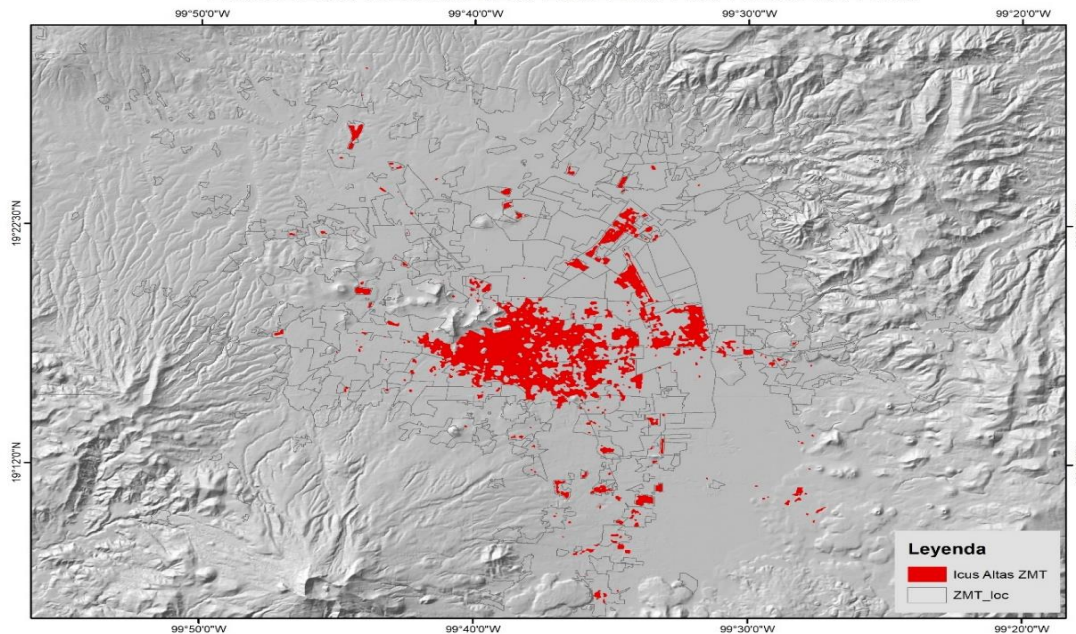
Persistencia de islas de calor en la Zona Metropolitana de Toluca.

Con base en el comportamiento de las islas de calor para cada uno de los años, se llevó a cabo la reducción de dimensiones a través del método de componentes principales. Los resultados muestran que las islas de calor que son persistentes a lo largo de los años analizados ocupan 73.8 km², lo que representa el 18.32% de la superficie total de la zona urbana. La distribución de las ICUS sigue un patrón similar al registrado por cada año mapeado, se observan las localidades que componen la zona centro-sur de la ciudad, las aledañas a la vialidad Tollocan y las que se localizan junto a la vialidad Aeropuerto; así mismo el área del municipio de Metepec que ya se habían descrito en los párrafos anteriores. Las mejores condiciones climáticas se localizan en la periferia de la metrópoli, sobre todo en la zona norte y en las localidades que están alejadas de la mancha urbana principal.

PERSISTENCIA ICUS



PERSISTENCIA DE ISLAS DE CALOR ALTAS Y MUY ALTAS 2014-2019



Detallando el territorio que presenta persistencia de islas de calor altas y muy altas a lo largo de los años, se identificaron las localidades que encabezan la lista. Son 14, las cuales concentra el 84% del total del espacio con mala condición climática y se describen en la siguiente tabla:

Localidades con mayor superficie ocupada por islas de calor persistentes

Localidad	% Área ocupada
<i>Toluca de Lerdo</i>	21.14
<i>Santa Ana Tlapaltitlán</i>	6.18
<i>Lerma de Villada</i>	5.97
<i>San Salvador Tizatlalli</i>	3.65
<i>San Francisco Coaxusco</i>	3.1
<i>Santa María Totoltepec</i>	3.08
<i>Metepec</i>	2.63
<i>San Francisco Totoltepec</i>	2.27
<i>San Jerónimo Chicahualco</i>	2.12
<i>San Jorge Pueblo Nuevo</i>	2.03
<i>Toluca 2000 [Parque Industrial]</i>	1.74
<i>San Lorenzo Tepaltitlán</i>	1.53
<i>Sauces</i>	1.29

Si se tomara en cuenta solamente la condición climática adversa, las localidades antes descritas serían el foco de atención para priorizar acciones de mitigación que posibiliten disminuir las intensidades de islas de calor alcanzadas a lo largo de los años de estudio analizados. Los esfuerzos respecto a las políticas públicas encaminadas a la mitigación de los efectos del cambio climático, tendrían que estar dirigidas a dichas localidades.

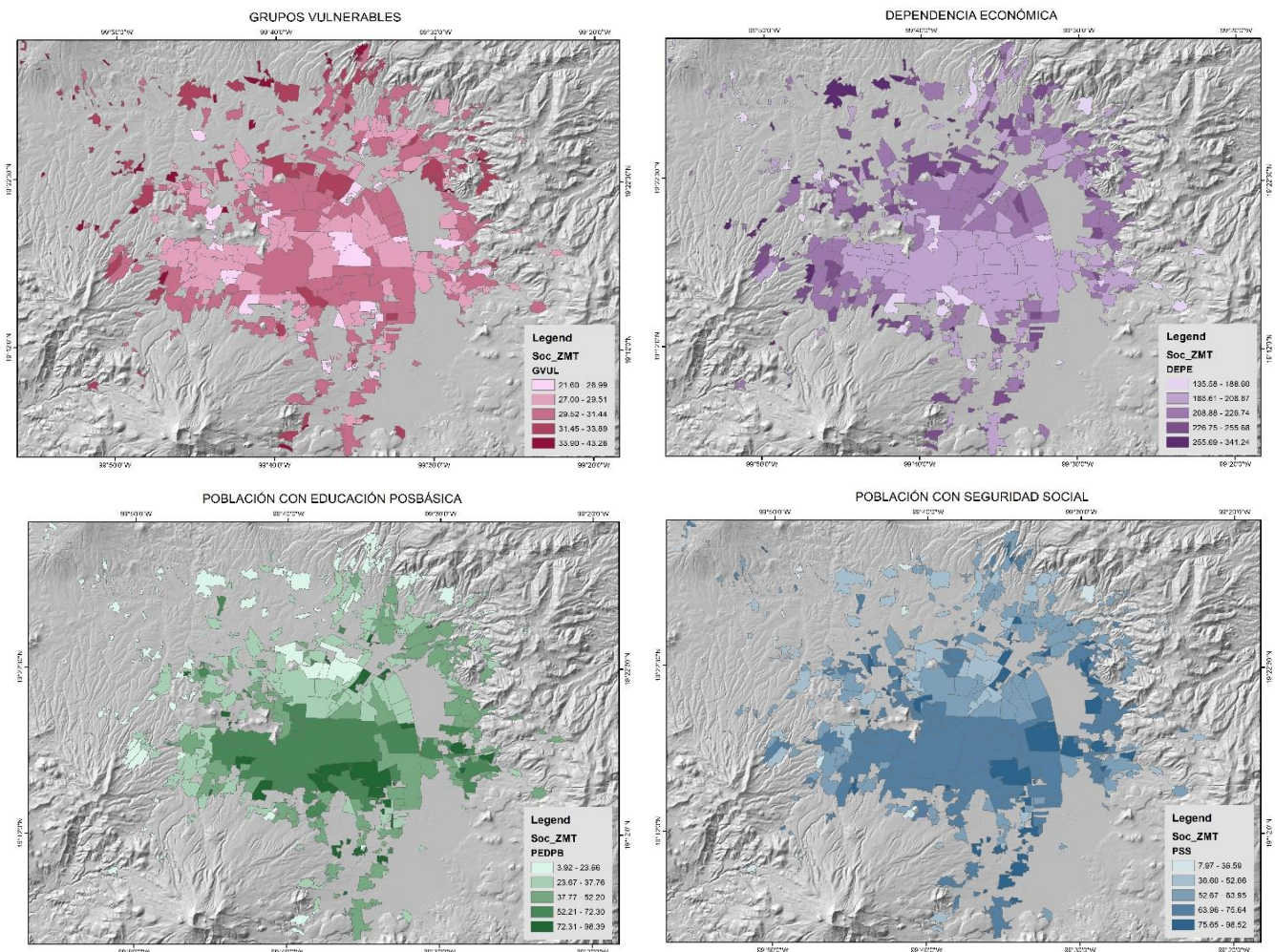
Etapas II. Condiciones socioeconómicas adversas en la ZMT

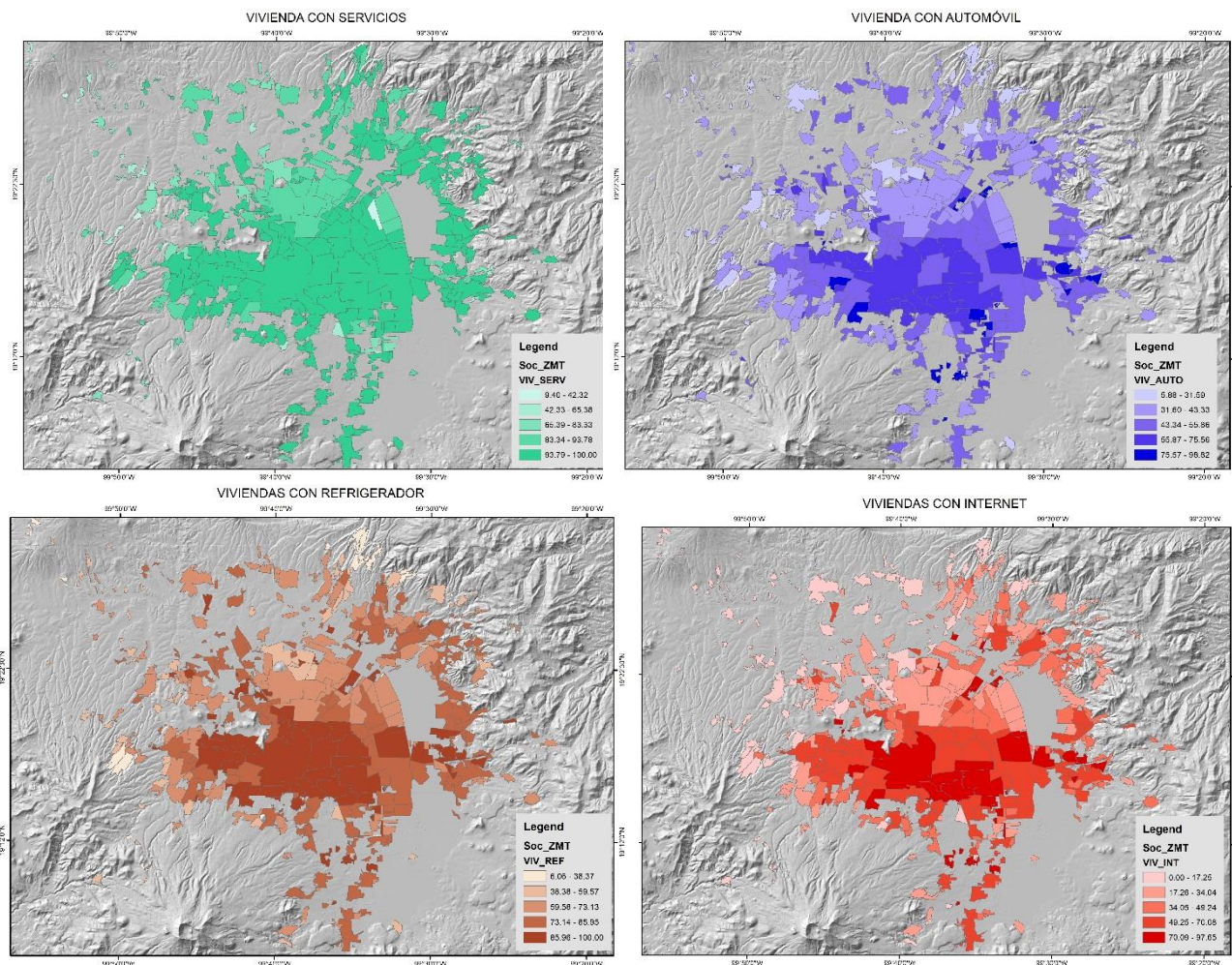
Conocer el estado que guarda la población que habita la Zona Metropolitana de Toluca, permitió identificar los sectores vulnerables en materia económica y social.

Respecto al subíndice de grupos vulnerables existentes en la metrópoli de estudio, la distribución muestra que los valores altos se concentran en las localidades periféricas, sobre todo hacia la zona norte de la ZMT. De las localidades que se encuentran al interior de la metrópoli y que presentan valores altos, tenemos a San Francisco Coaxusco.

Tomando en consideración la dependencia económica, el mapa de distribución muestra que las localidades con mayor dependencia económica también son las periféricas. Toda la franja centro de la zona metropolitana, presenta valores bajos.

Respecto a las variables de educación pos básica, seguridad social, servicios básicos y complementarios en la vivienda, la distribución espacial es muy parecida, los valores o porcentajes más altos se localizan al interior de la metrópoli, es decir toda la franja centro y parte sur de la misma. Los valores o porcentajes más bajos se encuentran en localidades periféricas, especialmente ubicadas al norte de la Zona Metropolitana.

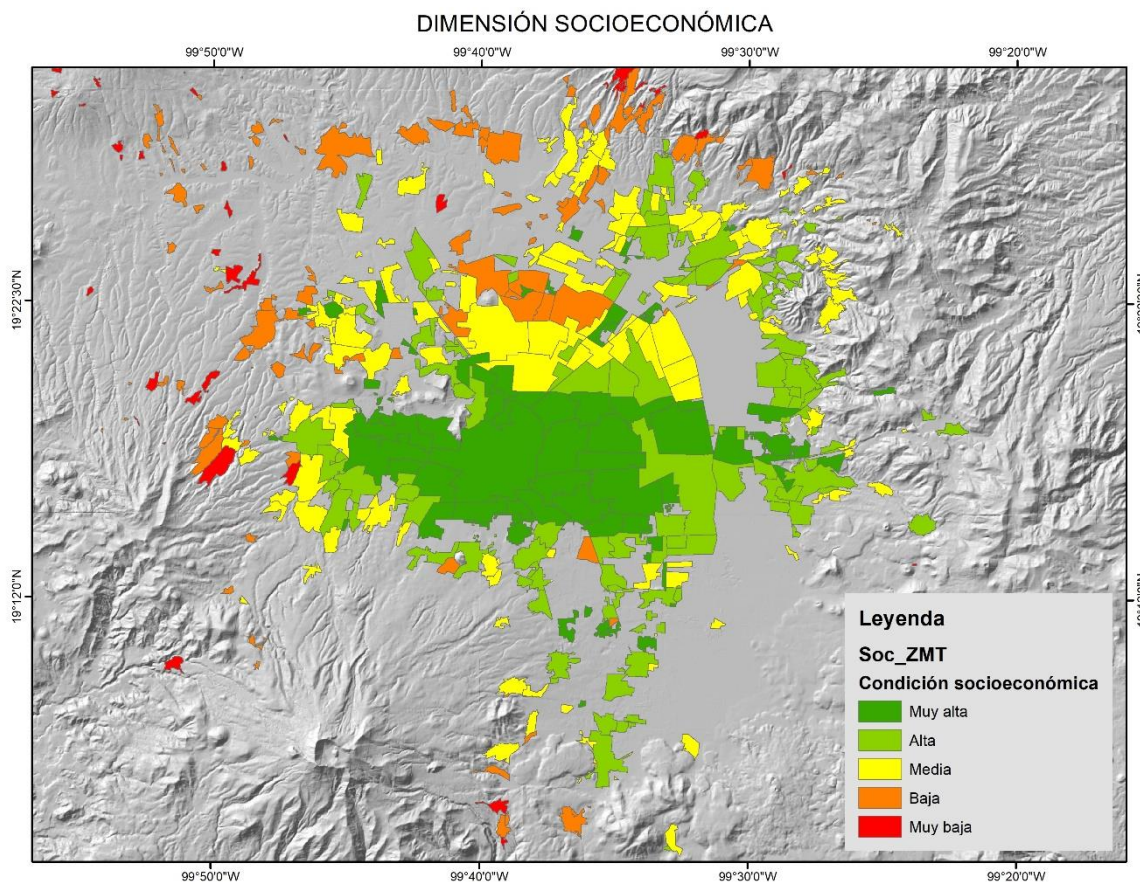




Se llevó a cabo el índice socioeconómico con base en las variables descritas en la parte metodológica. Las zonas con condiciones socioeconómicas óptimas aumentan la capacidad de la población a ser resilientes a los efectos adversos que puede provocar el clima urbano. Del total de las localidades que conforman la ZMT, 209 que representan el 42.65% de ellas, integra población que cuenta con buenas condiciones socioeconómicas. Son localidades que se ubican a partir de la Avenida Toluca hacia el sur de la metrópoli, en las zonas aledañas del centro y a través del corredor industrial Toluca-Lerma, así como al sur en el municipio de Metepec.

Las zonas socioeconómicas adversas, que condicionarán a la población a resentir más los efectos adversos del clima urbano, se distribuyen en 135 localidades, lo que representa el 27.5% del total. De ellos, 40, son los que poseen las peores condiciones en materia social y

económica pues presentan la clasificación de “muy mala”. Las localidades restantes poseen la clase “baja” y se localizan en las periferias de la Zona Metropolitana de Toluca, sobretodo en la parte norte y noroeste.

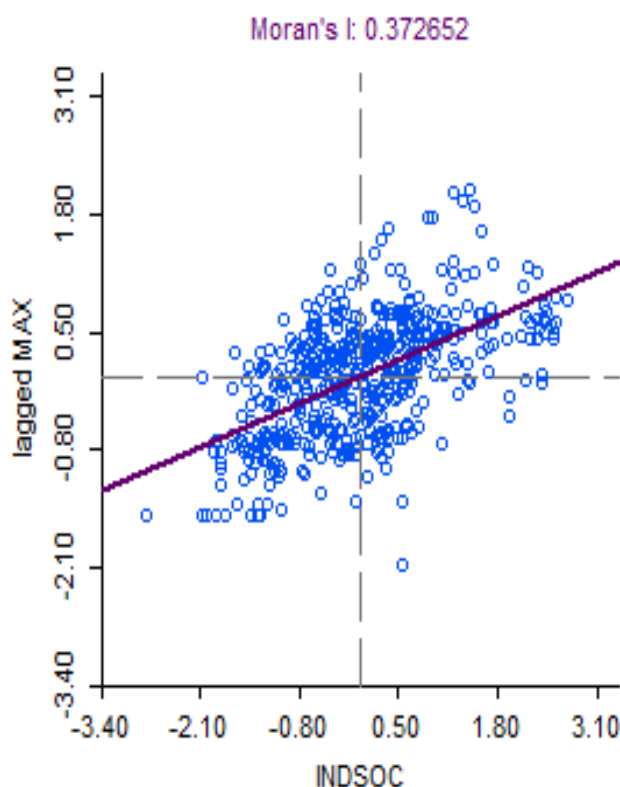


Etapametodológica III: Identificación de Zonas Socioclimáticas Adversas

Con base en los resultados obtenidos a partir de la correlación espacial realizada, se identificaron las zonas que poseen condiciones climáticas y sociales adversas. A diferencia de lo que marca la literatura, la ZMT no existe correlación entre altas intensidades de islas de calor respecto a malas condiciones socioeconómicas. Para poder analizar los datos respecto a que los valores altos indiquen condiciones adversas, se tuvo que cambiar el sentido a la variable del subíndice socioeconómico, para evidenciar con valores altos las localidades que tuvieran las condiciones más bajas respecto a cuestiones sociales y económicas.

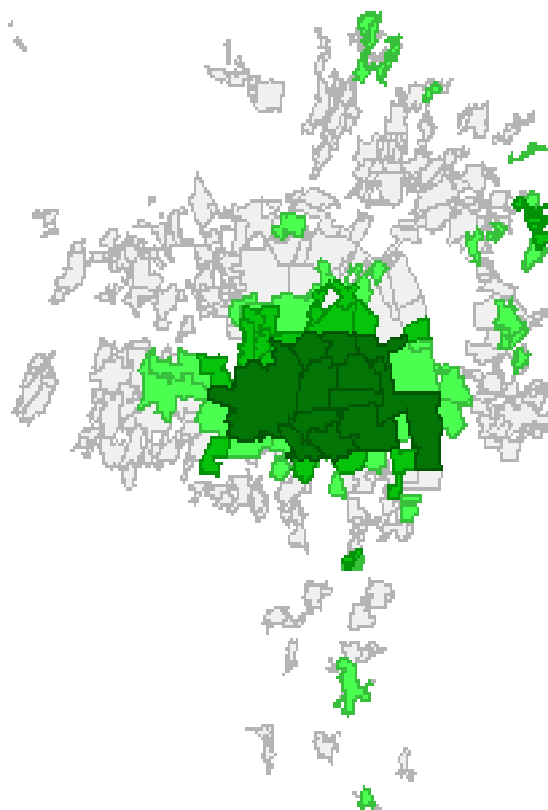
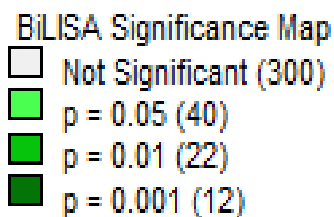
El índice de Moran bivariado presenta valores de 0.37, lo cual indica una autocorrelación espacial positiva, es decir, las unidades espaciales vecinas presentan valores próximos, los cuales indica una tendencia al agrupamiento de las localidades.

Sin embargo, la autocorrelación espacial estadísticamente significativa se da entre valores altos de intensidad de isla de calor y de condiciones socioeconómicas, es decir, las peores condiciones climáticas afectan a los sectores con mejores condiciones socioeconómicas de la metrópoli. Los sectores que se consideran vulnerables debido a cuestiones socioeconómicas presentan intensidades de islas de calor bajas y muy bajas, por lo que cuentan con condiciones más óptimas respecto a cuestiones climáticas.



El método LISA descompone el índice I de Moran y verifica en cuánto contribuye cada unidad espacial a la formación del valor general, permitiendo obtener un valor de significancia para cada cluster formado por los valores similares de cada unidad espacial y sus vecinos.

Para el caso de la ZMT y las variables elegidas, el valor de significancia de 0.05 se presenta en 40 localidades.



El indicador local de autocorrelación espacial (LISA) tiene como objetivo que el estadístico obtenido para cada localidad suministre información sobre la relevancia de valores similares alrededor de las mismas entidades de estudio. Mediante el análisis de datos, se registra la correlación que una misma variable tiene en diferentes unidades espaciales vecinas. El indicador permite visualizar la existencia de clústeres de las características que se mapean.

Para el caso de la Zona Metropolitana de Toluca, el I de Morán bivariado se calculó a partir del criterio de vecindad de la matriz tipo Queen. Los resultados presentan una autocorrelación espacial positiva, es decir, las unidades espaciales contiguas muestran valores similares. El patrón espacial presenta un comportamiento tendencial de agrupamiento de las unidades espaciales.

El índice bivariado resulta de describir una unidad espacial central con una variable y de considerar los vecinos de una variable complementaria pudiendo presentar los valores que se describen en la siguiente tabla:

Categorías para el Índice de Morán

Valor	Descripción
<i>Bajo-Bajo</i>	Indica que la unidad espacial central presenta valores bajos para la primer variable y que sus vecinos también cumplen con dicha característica con la segunda variable
<i>Alto-Alto</i>	Indica que la unidad central presenta valores altos con la primera variable y que sus vecinos también registran los mismos valores para la segunda variable.
<i>Bajo-Alto</i>	Indica que la unidad espacial central presenta valor bajo en la primera variable y las unidades contiguas muestran valores altos para la segunda variable.
<i>Alto-Bajo</i>	Indica que la unidad espacial central presenta valor alto en la primera variable y las unidades contiguas muestran valores bajos para la segunda variable.

Los resultados para la Zona Metropolitana de Toluca muestran que existe un agrupamiento espacial respecto la descripción de la unidad espacial central con una variable (intensidad máxima de isla de calor) respecto al comportamiento espacial de los vecinos con una variable complementaria (subíndice socioeconómico).

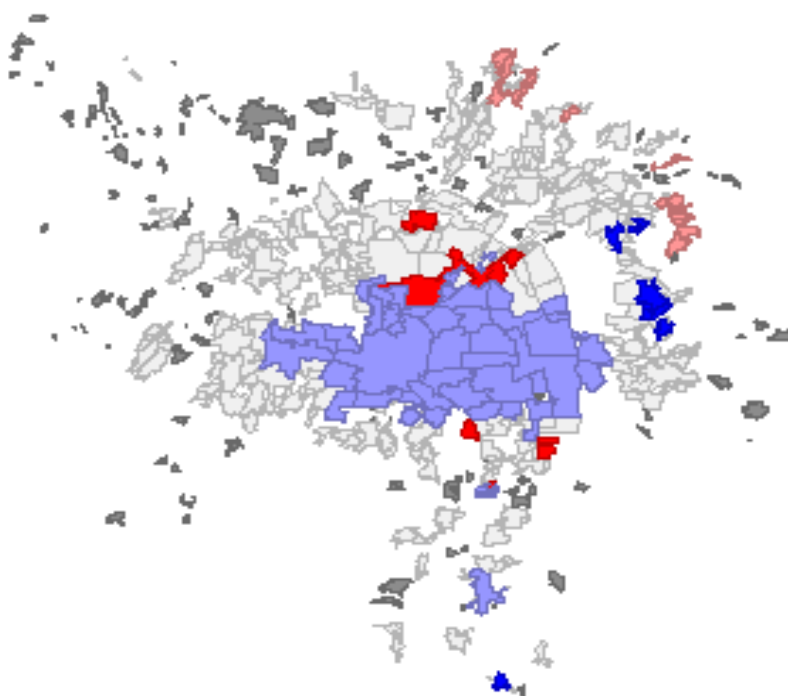
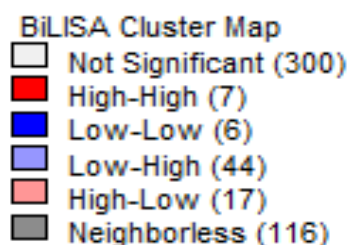
El mapa de clústeres indica que existen 10 localidades que presentan valores altos en intensidad de isla de calor y que sus vecinos poseen altos valores de condiciones socioeconómicas adversas, de esas 6 son localidades rurales y 4 urbanas las cuales son:

Urbanas

- San Cristóbal Huichochitlán
- San José Guadalupe Oztzacatipan y
- San Nicolás Tolentino
- Arroyo Vista Hermosa

Rurales

- San Diego Linares
- Las Minas
- Ejido de Chapultepec y
- Rancho el Mesón
- Guadalupe Totoltepec
- Rancho San Antonio



El mayor agrupamiento se da en la categoría bajo-alto, es decir, localidades que presentan bajas condiciones socioeconómicas adversas también presentan contigüidad con vecinos que poseen altas intensidades de islas de calor, como ya se había descrito anteriormente con el valor obtenido en el Índice de Moran.

El comportamiento espacial que se da en la ZMT, demuestra que las condiciones climáticas adversas afectan a población que presenta buena capacidad de adaptación o resiliencia respecto a los impactos negativos que puede generar las altas intensidades de islas de calor, por lo que la oportunidad de mejorar las condiciones climáticas respecto a las islas de calor tendría que avanzar de una forma más óptima.

Conclusiones

Identificar la sustentabilidad climática urbana a partir del indicador de islas de calor, permite a las ciudades conocer el estado que guardan en el aspecto climático adverso, teniendo en cuenta que en ellas vive la mayor parte de la población y que es a dicha población a quien se dirigen los impactos negativos que generan las icus.

La Zona Metropolitana de Toluca ha generado un cambio en el comportamiento de los elementos del clima regional, produciendo un clima urbano. El indicador de islas de calor, demuestra la persistencia de estas en el territorio a lo largo de los años analizados. La variabilidad de los datos para la temperatura de superficie es baja, es decir, los datos se comportan con cierta homogeneidad.

Las islas de calor con intensidades altas y muy altas que se detectaron en el territorio de estudio ocupan 73.8 km², lo que representa el 18.32% de la superficie total de la zona urbana, siendo 14 las localidades que concentran dicha condición. Encabezando la lista por mayor superficie se encuentran las localidades de Toluca de Lerdo, Santa Ana Tlapaltitlán, Lerma de Villada, San Salvador Tizatlalli y San Francisco Coaxusco.

Las zonas socioeconómicas adversas, se integraron a partir del análisis de variables de edad, condiciones socioeconómicas, vivienda y salud. La población vulnerable al clima urbano se concentra en localidades periféricas en dirección norte y este. Al interior de la ciudad existe poco porcentaje de adultos mayores y niños, lo que representa poca vulnerabilidad en este rubro.

Al conjuntar las variables a partir del Índice de Morán, el comportamiento muestra que las localidades con población que habitan zonas periurbanas y con niveles bajos en la dimensión socioeconómica, son los que poseen mejores condiciones climáticas, que a su vez, les permiten tener una calidad de vida más alta en materia ambiental. Por el contrario, las islas de calor con intensidades altas y muy altas afectan a las localidades que presentan mejores condiciones socioeconómicas, lo que permite vislumbrar que el camino a la sustentabilidad climática local puede ser más fácil, debido a que la población afectada no se considera vulnerable en el ámbito antes descrito y que se puede trabajar desde la política pública con acciones dirigidas específicamente a los territorios más afectados con la finalidad de construir espacios y sociedad resiliente a los impactos del clima urbano.

Bibliografía

Banco Mundial (2015). Indicadores de desarrollo mundial: población urbana. Consultado en: <http://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS?end=2015&start=1960>

EPA (2008). Reducing urban heat islands. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/production/files/201705/documents/reducing_urban_heat_islands_ch_1.pdf

Fernández, F. (1995). Manual de Climatología aplicada. Clima, medioambiente y planificación. Síntesis. Madrid.

García-Cueto O., Jáuregui-Ostos E., Toudert, D., Tejeda-Martínez, A. (2007). Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., México and its relationship with land use. *Atmósfera*, 20(2), 111-131.

INEGI (2016), Marco Geoestadístico Nacional, versión 2016. Disponible en línea: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx

INEGI (2020). XIV Censo General de Población y Vivienda 2020.

López, A., Fernández, F., Arroyo, F., Martín, J., Cuadrat, J.M. (1993). El clima de las ciudades españolas. Ed. Cátedra.

Montávez, J., Rodríguez, A., Jiménez, J. (2000). A study of the urban heat island of Granada. *Internacional Journal of Climatology*. 20: 899-911.

Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Routledge, 2nd edition. London

ONU-Habitat (2012). Estado de las ciudades de América Latina y El Caribe 2012, rumbo a una nueva transición urbana. Kenia: UN-HABITAT

Rivera, E., Antonio-Némiga, X., Origel-Gutiérrez, G., Sarricolea, P., y Adame-Martínez, S. (2017). Spatiotemporal analysis of the atmospheric and surface urban heat islands of the Metropolitan Area of Toluca, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 76(5), 225.

SEDESOL, CONAPO, INEGI (2012) Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010. México

SEDESOL, CONAPO, INEGI (2018) Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015. México

Voogt, J. (2008). Islas de Calor en Zonas Urbanas: Ciudades Más Calientes. Obtenido de <http://www.actionbioscience.org/esp/ambiente/voogt.html#primer>