



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

ANÁLISIS DE RIESGO EN CIUDADES POR CAMBIOS EN EL CLIMA
GENERADOS
POR CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTORA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
NURIA DELIA VARGAS HUIPE

DIRECTOR DE TESIS
VÍCTOR ORLANDO MAGAÑA RUEDA
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DR. ARTURO CURIEL BALLESTEROS - UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO - INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, ABRIL DE 2022



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.

Agradecimientos

Agradezco al CONACYT por brindarme una beca (371862) y a la UNAM (PAPIIT -112717) por las oportunidades de crecimiento, pero también tengo que agradecer a muchas personas:

A mi director de tesis, el Dr. Víctor Magaña por la paciencia, el apoyo, la guía académica y humana. Su creatividad y perfeccionismo son admirables y fuente de inspiración.

Al comité tutor, Dr. Arturo Curiel y Dr. Leopoldo Galicia, por su acompañamiento durante el proceso, gracias también por la paciencia, el apoyo, comentarios y recomendaciones que enriquecieron mi formación.

Al comité revisor de tesis, la Dra. María Engracia, el Dr. Tercio Ambrizzi, Dr. Matías Méndez, Dr. Ernesto Caetano y la Dra. Frances Rodríguez, por su lectura y atención, sus comentarios hicieron una mejora en la versión final de este trabajo.

A mis padres, mis hermanas y mi hermano, por toda la ayuda brindada siempre y sin condiciones.

A mis queridas amigas y mi amigo que sin duda han sido un apoyo en muchos sentidos desde el inicio y al final de esta etapa: Fabiola González, Fabiola Gutiérrez, Susanne Börner y Víctor Manuel Sánchez. A mis amigas del Arte: Isabel, Paola, Lulú, Iris, Monse, Aída, a Bertha Couvert, a mi entrenador Nabucodonosor Osorio.

El último estímulo, determinante para la culminación de mi tesis, son la presencia y el apoyo de Edgar Couttolenc y la existencia de Yunuen Couttolenc Vargas. Gracias.

Dedicatoria

A los urbanitas, para que conozcan uno de los problemas que aquejan a las ciudades y la importancia de los árboles y la vegetación. Y de esta manera exijan su derecho a vivir en un ambiente limpio y sano, conservando infraestructura verde en el interior de las ciudades.

.

Análisis de riesgo en ciudades por cambios en el clima generados por cambios en el uso del suelo.

ACRÓNIMOS	8
1.- INTRODUCCIÓN: RIESGO CLIMÁTICO	9
1.1 LA DETECCIÓN Y ATRIBUCIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	9
1.2. URBANIZACIÓN E ISLA DE CALOR URBANA.....	14
1.3 LA DINÁMICA DE LA ICU.....	19
1.4 URBANIZACIÓN, ISLA DE CALOR URBANA Y RIESGO	22
1.5 ONDAS DE CALOR	25
1.6 LLUVIAS INTENSAS	28
1.7 VULNERABILIDAD: DINÁMICA Y MULTIFACTORIAL	30
1.8 IMPACTOS DEL TIEMPO Y CLIMA SOBRE LA POBLACIÓN.	32
1.9. CLIMA Y DESASTRE.....	34
1.10 EL CASO DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO.....	36
1.11 LA IMPORTANCIA DE LA VEGETACIÓN URBANA Y LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS	37
1.12 HIPÓTESIS	38
1.13 OBJETIVOS	39
1.14 ESTRUCTURA DE LA TESIS	40
2.- DATOS Y METODOLOGÍA	42
2.1. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA	43
2.2. ANÁLISIS OBJETIVO DE DATOS	46
2.3 EL PELIGRO METEOROLÓGICO EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO	52
2.4 VULNERABILIDAD: UNA PROPUESTA PARA SU CUANTIFICACIÓN	55
2.5 RIESGO CLIMÁTICO: PELIGRO Y VULNERABILIDAD	57
2.6 RIESGO CRÍTICO Y DESASTRES	58
3. RESULTADOS.....	61
3.1 LA EXPANSIÓN URBANA DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO	61
3.2 EL CLIMA DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO	63
3.3 ISLA DE CALOR URBANA DE LA ZMVM.....	64
3.4 PÉRDIDA DE VEGETACIÓN Y TEMPERATURAS MÁXIMAS.....	69
3.5 EL PELIGRO CLIMÁTICO EN LA ZMVM: ONDAS DE CALOR	74
3.6 URBANIZACIÓN Y TEMPERATURAS MÍNIMAS.....	77
3.7 CAMBIOS EN EL CICLO HIDROLÓGICO	80
3.8 RIESGO POR ONDAS DE CALOR EN LA ZMVM.....	84
3.9 VULNERABILIDAD Y RIESGO ANTE ONDAS DE CALOR	88
3.10 RIESGO DE INUNDACIONES	95
4. DISCUSIÓN	102
4.1 DESARROLLO URBANO Y CONSTRUCCIÓN DEL RIESGO CLIMÁTICO	102
4.2 LA DINÁMICA DE LAS ONDAS DE CALOR	104
4.3 LAS IMPLICACIONES CLIMÁTICAS DE LA ISLA DE CALOR	107
4.4 LA DINÁMICA DE LA VULNERABILIDAD	108

4.5 EL FUTURO DEL RIESGO CLIMÁTICO	110
4.6 LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES	111
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
5.1 LA PLANEACIÓN URBANA CON CONSIDERACIONES DE RIESGO.....	119
5.2 ATLAS DE RIESGO.....	120
6. REFERENCIAS.....	122
7. ANEXOS	129

Índice de Figuras

Figura 1. Incremento de temperatura ambiente en el centro de México (10N-25N, 90W-115W).....	13
Figura 2. Expansión urbana de la Zona Metropolitana del Valle de México	16
Figura 3. Isla de Calor Urbana y Urbanización en Vancouver, Canadá.	20
Figura 4. Inundación en Tlalpan 2021.....	34
Figura 5. Dominio de estudio y evolución de la ZMVM	44
Figura 6. Climograma de la Ciudad de México	53
Figura 7. Temperatura máxima promedio en Tacubaya y usos del suelo.	65
Figura 8. Temperatura máxima	67
Figura 9. Histograma de temperatura máxima	69
Figura 10. Promedio de EVI.....	71
Figura 11. Cambios en EVI y cambios de temperatura máxima	73
Figura 12. Promedio de viento superficial	74
Figura 13. Percentil 90% de temperatura máxima diaria en la ZMVM a) 1965-1980, b) 2000-2015	76
Figura 14. Número medio anual de días con temperatura máxima superior a 30°C para el periodo a) 1960-1985 y b) 1990-2015	77
Figura 15. Campos medios anuales de temperatura mínima (°C) para los años a)1960-1985 y b) 1990-2015 78	
Figura 16. Número medio de días con temperatura mínima inferior a 5°C para el periodo a)1960-1985 y b) 1990-2015	79
Figura 17. Serie de temperaturas y precipitación en Tacubaya, CDMX.	80
Figura 18. Campos promedio de precipitación acumulada anual (mm/año) en a) 1960-1985 y b) 1990-2015 81	
Figura 19. Días con precipitación mayor a 20 mm.	82
Figura 20. Humedad específica.....	83
Figura 21. Egresos hospitalarios por EDAs.....	87
Figura 22. Índices de vulnerabilidad	91
Figura 23. Riesgo de contraer EDAs bajo episodios de calor en la ZMVM para a) 2000-2004 y b) 2010-2014.....	92
Figura 24. Tasas de egresos hospitalarios	93
Figura 25. Número de días con temperatura mayor a 30°C por año y precipitación anual acumulada del periodo 1953-2015.....	94
Figura 26. Estabilidad atmosférica	96
Figura 27. Inundaciones en la ZMVM	99
Figura 28. Cambios en el índice de vegetación EVI.....	100

ACRÓNIMOS

AGEB	Área Geoestadística Básica
AMO	Oscilación Multidecadal del Atlántico
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
COFEPRIS	Comisión Federal para la Protección Sobre Riesgos Sanitarios
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAPO	Consejo Nacional de Población
CRED	Centro de Investigación en Epidemiología y Desastres
EDAS	Enfermedades Diarreicas Agudas
ENOS	El Niño Oscilación del Sur
EVI	Índice Mejorado de Vegetación
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ICU	Isla Urbana de Calor
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
NARR	Reanálisis Regional de Norteamérica
NCEP	Centro Nacional de Predicción Ambiental
PDO	Oscilación Decadal del Pacífico
SACMEX	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
TICS	Tecnologías de la Información y la Comunicación
UNISDR	Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

1.- Introducción: Riesgo climático

1.1 La detección y atribución del cambio climático

El cambio climático se considera como el problema ambiental más importante en la actualidad. Luego de varios estudios, reuniones y convenciones a nivel global, se ha llegado a la conclusión de que las actividades del ser humano son los principales factores que lo provocan (CMUNCC, 1992).

Para abordar el concepto de cambio climático es necesario mencionar las definiciones más aceptadas en la literatura. Para el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007), éste es definido como un “cambio en el estado del clima que se puede identificar, mediante cambios robustos en las estadísticas que lo describen como puede ser en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un periodo prolongado, generalmente decenios o más. El cambio climático puede deberse a procesos naturales internos o a cambios en los forzantes externos, o bien, a cambios de origen antropogénico persistente que influyen en la composición de la atmósfera o en el uso del suelo”. Esta definición abarca tanto a factores de variabilidad natural del clima, como a los inducidos por el ser humano.

Para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUC) se trata de un “cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, y que

viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (CMNUCC, 1992). A diferencia de la primera definición, la CMNUCC deja claro que el cambio climático es resultado de las actividades humanas, concepción dominante en los medios académico y político.

La detección de cambio climático implica el trabajo con datos que correspondan a un largo periodo de tiempo, que pueden provenir de diversas fuentes: estaciones climatológicas, satélites, estimaciones por reanálisis, o estimaciones paleoclimáticas (Magaña y Galván, 2010). Por lo general, para evidenciar el cambio climático, se hace referencia a la tendencia en condiciones medias y a la variabilidad, en lo que generalmente corresponde a un ejercicio de detección.

Por otro lado, la causalidad del cambio climático, atribuida tanto a actividades humanas como a la variabilidad natural del clima, requiere un análisis en todas las escalas temporales, ya que procesos de variabilidad natural pueden crear confusión con los cambios de origen antrópico (Magaña y Galván, 2010). Incluso en ocasiones se cae en el error de confundir tiempo y clima y, por consiguiente, se categorizan fenómenos de tiempo, como si fueran efectos de cambio climático.

Aún cuando se traten de variaciones de muy largo periodo, la variabilidad climática puede deberse a forzantes internos, como los relacionados con la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), y otros.

Las variaciones del clima también pueden surgir de forzantes externos como la radiación solar, los aerosoles volcánicos, los gases de efecto invernadero emitidos por la tierra o cambios en parámetros astronómicos (IPCC, 2007). Las glaciaciones son un ejemplo claro de variabilidad del clima de muy baja frecuencia (miles de años). Sin embargo, hoy se considera que los cambios en el clima, inducidos por actividades humanas tienen una importancia especial, ya que no son recurrentes sino tendenciales, están ocurriendo en plazos relativamente cortos y se considera que no los estamos controlando por diversos intereses, haciendo que se conviertan en un peligro para nuestra seguridad y la del planeta (IPCC, 2007).

A través de modelos climáticos construidos con principios físicos, ha sido posible detectar la influencia de las actividades humanas sobre el sistema climático (IPCC, 2007). Cuando en los modelos se incluye, por ejemplo, el forzante de la concentración de gases de efecto invernadero, los resultados son coherentes con los diagnósticos de cambio del clima obtenidos con datos observados. De esta manera, se han establecido acciones para evitar que la temperatura promedio global del planeta siga aumentando, como reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que fuerzan radiativamente los aumentos de temperatura (CMNUCC, 2015).

Sin embargo, a nivel local, los cambios de clima pueden estar ocurriendo por factores distintos a la concentración de GEIs, o bien, aunados al calentamiento global.

En el mundo existen ejemplos de cómo los humanos han alterado el clima. Un caso común y claro son las ciudades y la formación de la Isla de Calor Urbana (ICU), resultado de los cambios en el uso del suelo. Desde el siglo XIX, los estudios de Luke Howard (Howard, 1833) sobre el clima de Londres mostraron que la urbanización alteraba el clima de las ciudades, con la publicación de *The Climate of London*, este tipo de diagnósticos resultaron las primeras pruebas de que el humano es capaz de alterar el clima. Desde entonces, son numerosos los trabajos que describen las ICUs que se han formado en un mundo cada vez más urbanizado. La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es un ejemplo de crecimiento urbano que ha resultado en profundos cambios del clima regional. A pesar de los trabajos que detectan e intentan atribuir el cambio del clima de la ZMVM (e.g., Jáuregui 2000), el impacto de la formación de la ICU en el Altiplano Mexicano parece extenderse más allá de la pérdida de confort, pues podría inducir enfermedades, alterar el ciclo hidrológico local y, en resumen, incrementar el riesgo climático (Vargas y Magaña, 2020a y 2020b).

Un diagnóstico de riesgo requiere una adecuada caracterización (espacial y temporal) del peligro, así como una cuantificación de la vulnerabilidad que lleven a explicar las características de los impactos que tiene el clima. Para el presente estudio, se analizó cómo los cambios de variables climáticas a escala local, en la Ciudad de México y su área metropolitana, dependen del grado y del tipo de urbanización seguido. Los cambios del uso de suelo (urbanización) ocurridos a nivel local han logrado modificaciones en el clima de gran magnitud (3°C en 70 años), sobre todo si se comparan con el calentamiento global en el centro de México, que

es de 1°C aproximadamente, en 70 años (Fig. 1). La preocupación de gobierno y sociedad por el cambio climático, debiera reflejarse en el cambio climático global, pero también en los cambios locales inducidos por nuestro modelo de desarrollo urbano. Reducir emisiones de gases de efecto invernadero debiera ser tan necesario como tomar acciones locales para “refrescar” las ciudades y de esta manera no caer solo en expresiones discursivas para “salvar al planeta”.

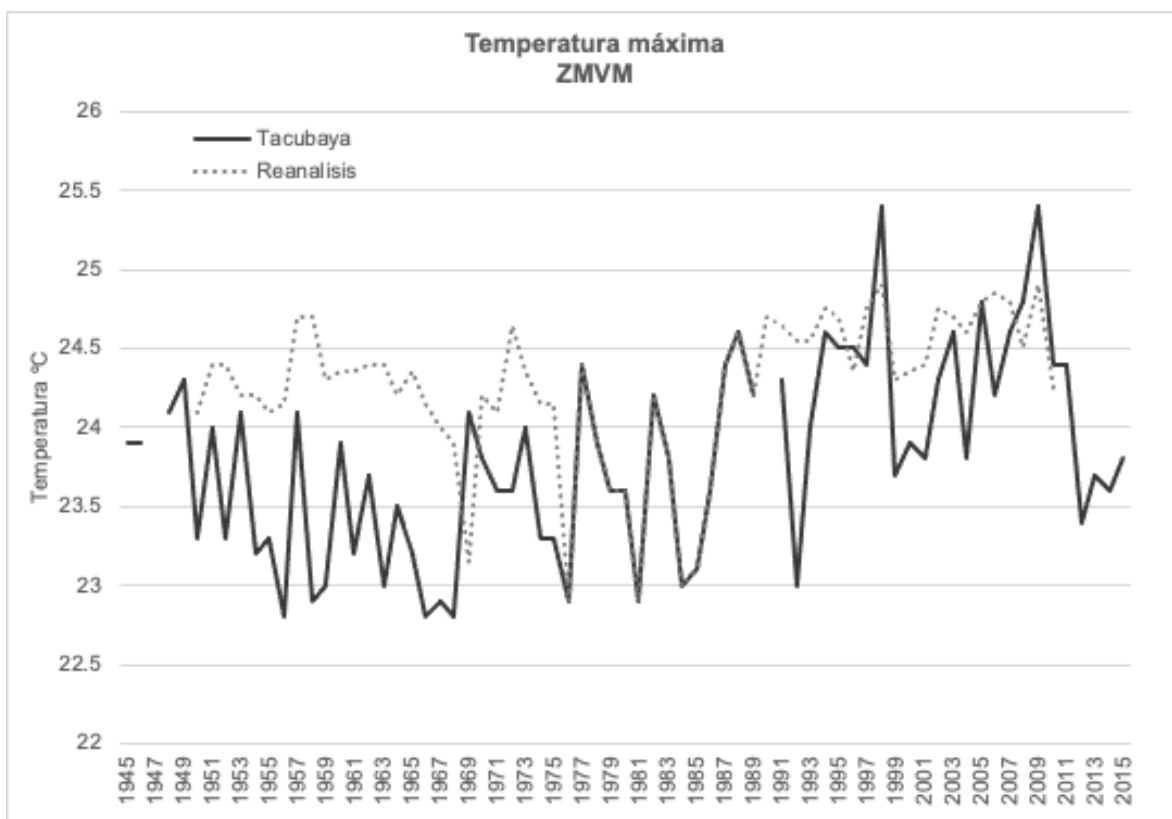


Figura 1. Comparativa del incremento de temperatura máxima en el centro de México (10N-25N, 90W-115W).

Periodo 1945-2015, de acuerdo con reanálisis de temperatura promedio anual (línea punteada gris) y datos de la estación meteorológica de Tacubaya (línea sólida negra). Fuente: NCEP/NCAR Reanalysis y SMN.

El problema del cambio climático local de las ciudades, conocido como ICU, genera un aumento en los peligros que enfrenta una creciente población urbana. En las

grandes ciudades mexicanas, la falta de planeación ha resultado en gran expansión urbana, altamente vulnerable a ondas de calor, lluvias intensas, episodios de alta estabilidad atmosférica, periodos secos, y otras expresiones del clima. Sin embargo, atribuir los cambios en el clima, mostrar que incrementan el riesgo, y demostrar que esto repercute en desastres, es una tarea que requiere un profundo trabajo de análisis de riesgo, de forma transdisciplinaria y creativa.

1.2. Urbanización e Isla de Calor Urbana

Desde mediados del siglo pasado el proceso de urbanización a escala global se produjo de manera acelerada. Actualmente, más de la mitad de la población mundial habita en ciudades, pero en América Latina la proporción es del 80% (ONU, 2018). Las proyecciones a futuro indican un incremento continuo de la población urbana, destacando el aumento de ciudades grandes o megalópolis, de más de 10 millones de habitantes (UNHABITAT, 2016). Con dicho crecimiento se ha producido un aumento en el número de desastres hidro-meteorológicos a nivel urbano, con altos costos económicos y sociales (DesInventar, 2018). Por ello, es necesario planear el crecimiento de las ciudades de tal manera se reduzca el riesgo de desastres y con ello se eviten problemas como los que van en aumento en las grandes ciudades (e. g. ICU, inundaciones, contingencias ambientales).

La concentración de una población urbana que sigue en aumento resulta preocupante, porque con frecuencia va aparejada de problemas ambientales que

se reflejan en problemas de salud de la población y deterioro del ambiente, es decir, en la calidad de vida de las personas. La pobreza, la insalubridad, la densificación poblacional, la contaminación y otros problemas parecen estar fuera de control en las urbes de los países en desarrollo. Con la atención concentrada en el cambio climático global y sus potenciales implicaciones sobre las poblaciones humanas, la problemática suscitada al interior de las megaciudades parece en ocasiones ser desatendida, ya que las afectaciones en estos sitios se han ido incrementando por el aumento de la población, es decir, se incrementa la exposición. La variabilidad climática natural que se manifiesta en sequías meteorológicas y socioeconómicas, en inundaciones urbanas y ondas de calor con afectaciones a las personas en grandes urbes no siempre es explicada como consecuencia de lo que la actividad humana ha hecho sobre el medio ambiente, y de ahí que persista un enfoque naturalista del desastre, en el que el fenómeno atmosférico es directamente el responsable de los daños.

A pesar de todo, las ciudades siguen siendo polos de atracción pues es en ellas donde se produce la mayor riqueza de los países. La Ciudad de México se encuentra entre los 5 primeros lugares de las urbes más grandes del mundo, después de Tokio, Nueva Delhi, Shanghai y Sao Paulo. El crecimiento de la Ciudad de México durante la segunda mitad del siglo XX, se había dado hasta los límites del Distrito Federal, de una manera más o menos concentrada, compacta. Pero, hacia finales del siglo XX, la urbanización se expandió hacia el Estado de México, con asentamientos en áreas de conservación ecológica, terrenos agrícolas y suelo natural, de una manera discontinua y segregada (CAME, 2000). Por ello, se hizo

más conveniente llamar a esta urbanización Zona Metropolitana del Valle de México, pues con esta denominación, se incluye tanto a la Ciudad de México (antes Distrito Federal), como a los 58 municipios aledaños que forman el conglomerado, incluyendo aquellos en los estados de México e Hidalgo (Fig. 2).

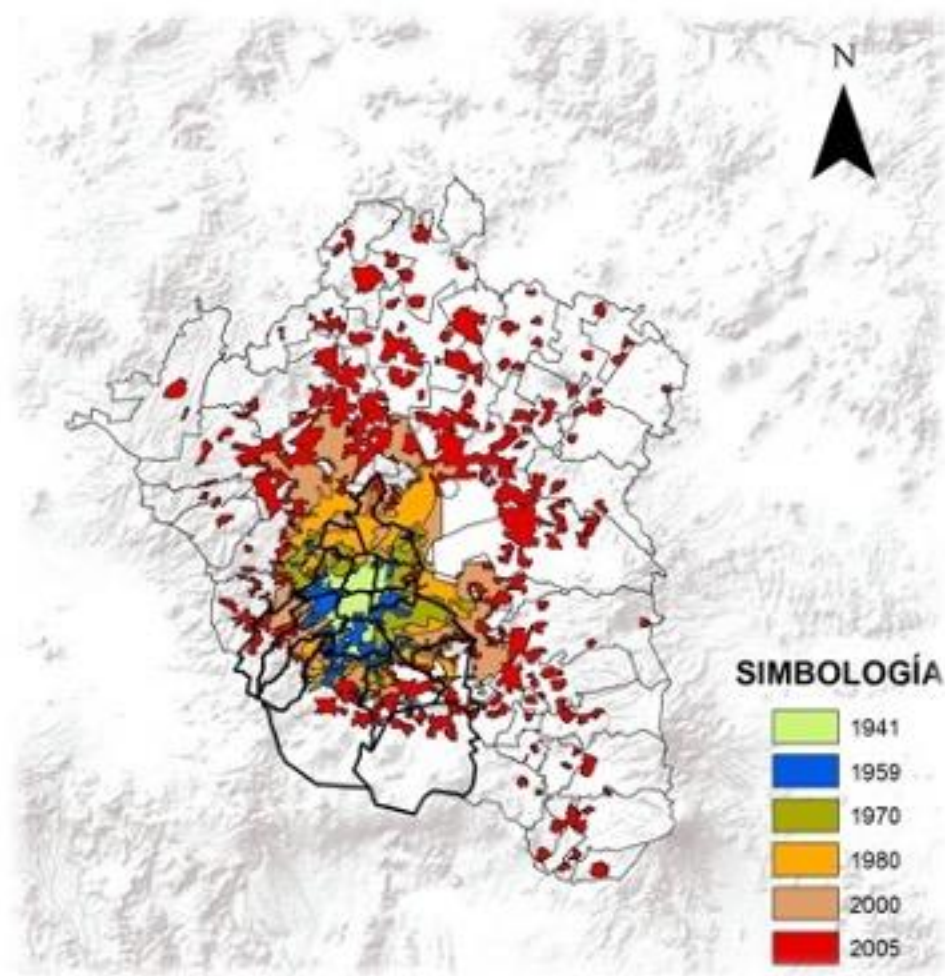


Figura 2. Expansión urbana de la Zona Metropolitana del Valle de México

1941-2005. Fuente: CONAPO e INEGI.

Una característica de esta expansión urbana desfragmentada fue la adición de municipios o pueblos con núcleos urbanos desconectados del núcleo central de la

ciudad, creando polos habitacionales carentes de servicios y mal comunicados a la parte más desarrollada de la ciudad. Este modelo de urbanización denominado “policéntrico”, se constituye de un sistema complejo de dinámicas organizacionales y espaciales cuyos costos son altos en materia de bienestar social, ya que la dotación de servicios se hace difícil y costosa, por lo que es ineficiente y en ocasiones inexistente a las zonas más alejadas del centro (Aguilar, 2002). Aunado a ello, se crean problemas ambientales (e.g. deforestación y contaminación) que en ocasiones generan modificaciones al clima local e incluso global, por las emisiones de gases de efecto invernadero y los cambios de uso del suelo (Kalnay, E. y M. Cai, 2003). Las alteraciones al ambiente traen consigo problemas de salud, pérdidas económicas y gasto energético enorme, lo que hace reflexionar sobre el modelo de crecimiento de las ciudades mexicanas. Esta ocupación urbana expandida del espacio afecta los intercambios de energía entre la superficie y la atmósfera generando, en el largo plazo, modificaciones en el clima local y regional (Pielke et al., 2002).

Las urbes se configuran internamente de diversas maneras y su espacio natural y construido presenta características propias en el paisaje. Un barrio con un conjunto de edificios altos, con pendientes escasas y nula vegetación tiene características climáticas distintas a un conjunto de edificios medianos, con pendientes pronunciadas y cercanos a un parque. Debido a esta heterogeneidad en las ciudades, se pueden categorizar zonas climáticas según su tipo de urbanización (Stewart y Oke, 2012). La Zona Metropolitana del Valle de México, por ejemplo, se constituye de al menos 4 tipos: i) centro, con edificios antiguos con parques urbanos,

ii) zona norte-poniente, con industria, edificios habitacionales y poca vegetación, además de encontrarse en la parte más baja de la cuenca, iii) zona sur, con edificios medianos, espacios vegetados, presencia de suelo de conservación y ubicada en la parte alta de la cuenca, y finalmente la iv) en el norte-oriental de la ciudad, ubicada en la parte baja de la cuenca, con alta densidad de infraestructura gris. El efecto de cada tipo de urbanización en el clima puede variar dependiendo del uso del suelo dominante, con los mayores impactos en zonas de infraestructura gris. De esta manera el comportamiento de las temperaturas máximas y sus tendencias es diferente para cada zona, por lo que, de acuerdo a la configuración urbana y los parámetros topográficos, existen señales de cambios en el clima contrastantes entre una y otra región. Entre el nororiente, las temperaturas máximas pueden alcanzar más de 30°C, mientras en la zona sur, la máxima no llega a los 30°C. En general, la tendencia de calentamiento ha sido mayor en zonas con poca vegetación, mientras que zonas que conservan su carácter rural mantienen un clima relativamente constante.

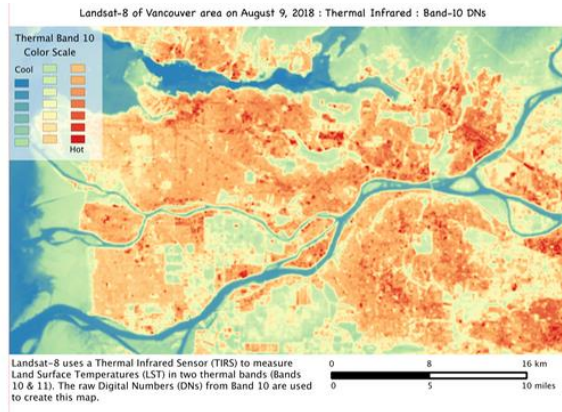
La urbanización puede afectar el clima a nivel local e incluso regional. El reemplazo de suelos naturales por superficies de concreto, acero y vidrio, resulta en superficies impermeables y con estructuras que reducen las zonas de áreas verdes. El calor del sol se usa sólo para calentar y no para evaporar, por ejemplo, con lo que la energía del suelo deja de fluir como calor latente y se concentra como calor sensible, lo que se traduce en altas temperaturas del aire cerca de la superficie. La misma generación de calor producto de la actividad humana se convierte en factor que influye el tiempo meteorológico y el clima, al modificarse el balance de energía.

De esta manera, se da paso a la formación de la ICU, la cual puede inducir floraciones precoces de la vegetación en las urbes, un incremento de consumo de energía eléctrica para enfriamiento artificial (Sisto et al., 2016) o golpes de calor en la población humana (Cueto, et al., 2010), entre otros efectos (Oke et al., 2017)

1.3 La Dinámica de la ICU

La ICU es definida como el área de una ciudad que es más caliente con respecto a sus alrededores rurales (Oke et al., 2017) y se forma cuando al eliminar vegetación, disminuye el calor latente y aumenta el calor sensible. Dado que las plantas y árboles son organismos que utilizan la radiación solar en sus procesos fisiológicos (evapotranspiración), su eliminación lleva a una alteración del balance de energía, y un incremento de calor sensible que emiten superficies de suelo desnudo u otros materiales de construcción como asfalto, concreto, vidrio, etc. Así, la temperatura de la superficie del suelo y cerca de la superficie, se eleva en zonas densamente urbanizadas (Fig. 3).

a)



b)



Figura 3. Isla de Calor Urbana y Urbanización en Vancouver, Canadá.

a) Imagen LandSat de temperatura de superficie del suelo (LST por sus siglas en inglés) de la banda térmica sobre Vancouver Canadá, para el 9 de agosto de 2018, mostrando la zona considerada ICU. b) Imagen de falso color sobre Vancouver, para mostrar zonas de urbanización.

En México, el estudio de la ICU data de finales del siglo XIX, con el trabajo de Manuel Moreno (1897), quien analizó los contrastes térmicos entre el centro de la Ciudad de México (Palacio Nacional) y el observatorio de Tacubaya, sitio que entonces tenía un carácter rural. El efecto de la urbanización en el clima de las ciudades se manifiesta principalmente como un aumento en las temperaturas máximas, así como una reducción en la amplitud del ciclo diurno de la temperatura, reducción debida al aumento de las temperaturas mínimas. A medida que crece la

zona urbanizada y aumenta la densidad de construcciones se hace más lento el enfriamiento del aire urbano nocturno respecto al aire rural.

Una aproximación para diagnosticar la ICU es a través de la diferencia de balances de energía entre un área rural y una urbana. La ecuación que describe el balance de energía (Oke, 1988) está dada por:

$$Q^*+Q_F= Q_H+Q_E+Q_S+\Delta Q_A(Wm^{-2})$$

donde

Q^* es el flujo de radiación neta

Q_H y Q_E son los flujos de calor sensible y calor latente, respectivamente

Q_S es la energía liberada o absorbida por calor sensible dentro del aire del dosel urbano

ΔQ_A es el flujo de calor neto de la advección horizontal

Q_F es el calor antrópico liberado por consumo de combustibles, y es un factor que solo está presente en ciudades, pero para otros ecosistemas no debe incorporarse.

La pérdida de vegetación no sólo altera el balance entre calor latente y sensible, sino que con frecuencia altera las circulaciones locales, lo que lleva a que se alteren los procesos de advección de calor.

Son diversos los estudios que han mostrado que en el balance radiativo para la Ciudad de México, hay una disminución en calor latente y aumento del calor sensible (Jáuregui, E. y A. Tejeda, 1998). Sin embargo, en el balance de energía pocas veces hace uso de los otros términos, lo que puede significar un balance

incompleto para ciertas zonas de la ciudad. Por ejemplo, el término de la advección es un elemento que pocos autores consideran (Ballinas, M. and V. Barradas, 2016), ya que se enfocan principalmente en la componente vertical, donde tiene lugar el intercambio de calor. Sin embargo, en la dimensión horizontal también ocurren intercambios importantes de energía y calor (Oke et al., 2017). La estructura topográfica de la cuenca de México, hace que los transportes horizontales por efecto de la brisa valle-montaña sean relevantes.

1.4 Urbanización, isla de calor urbana y riesgo

Las investigaciones sobre las ICUs, frecuentemente describen el caso de ciudades de latitudes medias como Londres (Wilby, 2006), Shangai (Tan et al., 2010), Nueva York (Gaffin et al., 2008), pero para ciudades tropicales los estudios son muy pocos. La importancia de llevar a cabo investigaciones para urbes en los trópicos radica en que las proyecciones de mayor crecimiento urbano, sugieren que son estas zonas las que más crecen y crecerán en los años por venir. Se tiene previsto que Asia, África y Latinoamérica, contengan las ciudades más pobladas a partir de 2030 (HABITAT, 2016). Además, se espera que el crecimiento urbano sea desordenado y rápido, por lo cual los riesgos seguirán aumentando, particularmente los de tipo climático.

En modelos de crecimiento expansivo, solo los barrios de clases socioeconómicas altas preservan árboles, vegetación y cuerpos de agua, mientras la población marginada se establece en lugares densamente ocupados y, con frecuencia, en

lugares no aptos para asentamientos humanos. Desde hace muchos años, las zonas periféricas de las grandes urbes de Latinoamérica, crecen en gran medida por la presión de asentamientos irregulares (Tomas, 1996).

Esta dinámica urbana tiene consecuencias, pues si bien en algunas zonas se preserva la infraestructura verde y sus servicios ecosistémicos, al hacer cambios de uso de suelo con urbanización no planeada, la vulnerabilidad de los asentamientos a eventos meteorológicos extremos aumenta. Las autoridades tienen entonces que sustituir esos servicios ecosistémicos, como los de regulación climática o hídrica, por grandes y costosas obras de ingeniería, o la gente tiene que buscar soluciones con tecnología como son los aparatos de aire acondicionado, o con obras que permitan escurrimiento de aguas pluviales, como bocas de tormenta. De otra forma, solo les queda padecer las consecuencias por calentamiento de la ciudad, la acumulación de contaminantes en la atmósfera y las inundaciones.

Al respecto, los patrones climáticos presentan variabilidad a lo largo del tiempo, de una manera en la que no siempre el factor humano es el principal motor de cambio. El clima es una condición que cambia de forma gradual y continua y modula las condiciones para la ocurrencia de eventos de tiempo severo que se traducen en peligro. En pocas palabras, “el clima pone las reglas del juego para la dinámica meteorológica”. La variabilidad y cambios en el clima modulan con frecuencia la ocurrencia de eventos extremos de calor o lluvia. Por ejemplo, la forma de variabilidad interanual del clima más conocida corresponde a El Niño/Oscilación del Sur (Díaz y Markgraf, 2000).

Las condiciones El Niño (o La Niña) tienen una recurrencia de entre 2 y 7 años, y una duración de entre 1 y 2 años. Bajo condiciones El Niño, las lluvias de verano en gran parte de México son escasas lo que corresponde a menor nubosidad y con ello a temperaturas máximas más elevadas.

Otra forma de variabilidad del clima de baja frecuencia es la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) (Mantua et al., 1997), con periodos de recurrencia de 20 a 30 años. Como forma de variabilidad del clima de muy baja frecuencia, la PDO modula condiciones climáticas a nivel regional. Con la presencia de alguna de estas condiciones, las grandes urbes verán su clima determinado por una condición de ICU y las formas de variación del clima conocidas como señales de la variabilidad natural del clima. Así, en ciertos años o periodos la intensidad de la ICU puede ser aún mayor que en otras épocas (IPCC, 2012).

La variación de eventos extremos de tiempo y clima bajo formas de variabilidad de muy baja frecuencia del clima pueden resultar en un mayor o menor peligro. En la parte centro sur del país, ante la presencia de un año Niño, por ejemplo, las temperaturas pueden llegar a ser muy altas en comparación con un año sin la presencia del fenómeno (Magaña, 1999). Debido a que es reciente nuestro conocimiento sobre patrones y ciclos del clima, es aún necesario determinar cómo interactúan formas de variación de la circulación atmosférica de baja frecuencia y eventos de tiempo con algunos días de duración (Herrera, 2020). Para el caso del clima de la Zona Metropolitana del Valle de México, los eventos extremos que causan mayores estragos son las lluvias intensas, que resultan en inundaciones,

así como las ondas de calor, menos mencionadas como fenómeno peligroso, pero no por ello menos importantes para la salud de la población.

1.5 Ondas de calor

El estudio del cambio climático ha mostrado que los valores promedio de elementos del clima no son suficientes para analizar la variabilidad y tendencias del clima. Los impactos por condiciones de tiempo o clima extremos son los que más forman parte del estudio del riesgo climático. Las estadísticas para documentar valores extremos son un primer elemento para definir lo que se considera valores peligrosos. Las temperaturas máximas extremas son un factor de peligro cuando rebasan ciertos valores umbral, pero el valor exacto de dicho factor dependerá de la condición de vulnerabilidad. Una persona de un clima cálido puede considerar que 30°C de temperatura máxima no es un problema. Pero dicho valor para una persona de clima frío puede ser causa de afectaciones a su salud. Es por ello que se hace necesario estudiar, evaluar, analizar y determinar qué son las ondas de calor y el por qué de los impactos que generan en la población.

Las ondas de calor no tienen una definición estándar ni universal, sino que cada lugar o sector específico, presenta condiciones locales que definen lo que son. Se puede establecer una onda de calor a partir del número de días consecutivos con una temperatura alta, como puede ser el percentil 90 de máxima temperatura, o algún otro factor de calor extremo (Perkins y Alexander, 2013). Su impacto en las personas depende con frecuencia de las condiciones de humedad y por ello se hace

referencia también a índices de calor (Steadman, 1979), que se calculan usando información de la temperatura y la humedad relativa, para ciertos sectores o grupos afectables.

De esta manera, se puede hablar de índices de calor en sector salud, en la agricultura, los ecosistemas, u otros sectores. Por ejemplo, para calcular morbilidad humana y calor excesivo se recurre a factores como metabolismo y tipo de ropa que se usa. Estas variables para determinar impactos, generan incertidumbre y por ello, más que hablar de impactos en forma determinista, se recurre a hablar de riesgo, en términos de probabilidades.

En México, existen estudios de ondas de calor en ciudades como Mexicali (García, Tejeda y Jáuregui., 2010) , San Luis Río Colorado, Caborca y la Ciudad de México (Jáuregui, 2009). En la primera, las temperaturas máximas extremas llegan a ser las más altas del país (arriba de 45°C) y es el lugar donde también se registran más muertes por golpe de calor a nivel nacional (Díaz et al., 2014). Para el caso de la Ciudad de México, la importancia de las ondas de calor radica en los impactos indirectos que pueden tener en sectores de la población vulnerable: edad, estado de salud, acceso a servicios básicos, conocimiento del riesgo). Estos factores combinados con el clima (e.g., ICU) elevan los niveles de riesgo y hacen probable que se presenten impactos.

Para el Valle de México, las ondas de calor se han definido como episodios de más de dos días con temperatura arriba de los 30°C (Jáuregui, 2009). Dichos episodios de calor son cada vez más frecuentes, pasando de menos de 10 por cada década

desde 1930-1940 a casi el doble en las últimas dos décadas del siglo XX (Jáuregui, 2009), lo que representa un aumento significativo en el peligro por calor que enfrenta la ciudad.

En nuestro país, los períodos de calor de las ciudades se han incrementado, en parte por los modelos de urbanización que no consideran la infraestructura verde o espacios con vegetación, y como parte de la tendencia del clima global. La actividad humana en las ciudades (industria y autotransportes) contribuyen para que el calor en las ciudades sea identificado a través de la percepción de las personas (Martins, 2019).

La ocurrencia de ondas de calor en las ciudades es un factor de riesgo que, cuando se materializa en desastre, puede resultar en catástrofe, como sucedió en Europa en el año 2003, cuyo saldo mortal fue de 70 mil personas (Robine et al., 2008). De acuerdo a las condiciones de cada lugar, el calor puede impactar en muertes, salud, contingencias ambientales, incremento en las demandas de agua y energía eléctrica, o de forma indirecta en la calidad de vida de las personas, sobre todo aquellas consideradas como vulnerables.

Por ello, estudiar los impactos de eventos como son las ondas de calor requiere un enfoque de riesgo, no sólo para encontrar las causas del problema, sino para buscar formas que reduzcan el riesgo y con ello los impactos.

1.6 Lluvias intensas

Son numerosos los trabajos en los que se relaciona la expansión urbana y la ICU con el aumento de la precipitación (Landsberg, 1956), (Changnon, 1992), (Dixon y Mote, 2003), (Kang et al., 2021). Los argumentos para relacionar la urbanización con cambios en los patrones de precipitación están relacionados con : i) Cambios en la temperatura y humedad en la capa límite y en el agua precipitable de la troposfera, ii) Cambios en la estabilidad atmosférica debidos al calentamiento cerca de la superficie, iii) Cambios en la superficie por la rugosidad que generan los edificios, iv) La convergencia de humedad en los niveles bajos de la atmósfera, v) cambios en la humedad del suelo relacionados con los cambios de uso del suelo y, vi) la adición de humedad a la atmósfera por los sistemas hidráulicos urbanos (Cotton, W. R. and Sr. R. A. Pielke, 2007). Recientemente, (Vargas y Magaña, 2020b), mostraron que en la Ciudad de México las condiciones de humedad extrema ($q > 16$ g/kg) son más frecuentes ya que la atmósfera más caliente puede almacenar más humedad (Trenberth et al., 2003).

Aunque demostrar que más humedad atmosférica se debe al efecto de urbanización no es sencillo, se ha concluido que, en algunos casos la formación de la ICU genera mayor potencial para contener humedad debido al incremento de la temperatura en la capa límite, así como menor estabilidad atmosférica (Changnon y Vogel, 1981), (Bornstein y Lin, 2000). El reto es mostrar que las condiciones urbanas de superficie pueden inducir el desarrollo de nubes profundas y con ello, lluvias intensas.

La estabilidad atmosférica reducida resulta principalmente de una diferencia mayor de temperaturas entre la superficie y las capas superiores, así como de mayor contenido de humedad. De la relación de Clausius-Clapeyron se desprende que “una burbuja” de aire cálido, como la asociada a la ICU, puede contener más humedad que un volumen de aire a menor temperatura. Ambos procesos, la menor estabilidad y el aumento en la humedad atmosférica, aunados a la convergencia producida tanto por una baja térmica y la rugosidad de la ciudad (Changnon y Vogel, 1981), terminan por generar precipitaciones intensas.

Para la zona de estudio, el trabajo de Jáuregui y Romales (1996), muestra que la ICU está relacionada con una mayor frecuencia de tormentas intensas (mayores de 20 mm/h) en la Ciudad de México, ya que el periodo de mayor urbanización coincide con el incremento de las precipitaciones intensas, así como el patrón diurno (vespertino) en que caen. Al respecto, estos autores encontraron que las lluvias han cambiado el horario en que se presentan, al incrementarse las probabilidades de aparecer entre las horas de la tarde y el inicio de la noche. La ICU durante el periodo lluvioso, permite que las diferencias de temperatura (entre la zona urbana y la rural) sean significativas como para producir mayor convergencia en las horas de la tarde, llevando a formar nubes y precipitación. Cabe aclarar que este proceso es particular y solo en algunas ciudades permite explicar el aumento de la convección profunda (Jáuregui E. y E. Romales, 1996). La tendencia a que las lluvias de verano en la ZMVM sean las que aumentan, indica que los procesos de mesoescala son clave, pues son los que pueden modificarse con cambios en el uso del suelo.

1.7 Vulnerabilidad: dinámica y multifactorial

Un aumento en las precipitaciones y en las ondas de calor ya tienen impactos importantes sobre las ciudades. Dentro de la literatura sobre riesgo, cambio climático y desastres, existe una amplia variedad de aproximaciones al problema de las ciudades. La mayoría mencionan como factores tanto al peligro como a la vulnerabilidad, pero en pocas ocasiones cuantifican o demuestran que un modelo de riesgo explica la tendencia de los desastres recientes (Neri, C. y V. Magaña, 2016). Algunos estudios presentan un sesgo hacia factores como la vulnerabilidad social, mientras que otras la abordan desde un punto de vista de las ciencias naturales con gran énfasis en el concepto del peligro (O'Brien et al., 2008).

Los trabajos de impactos por cambio climático basados en el peligro, consideran estimaciones *top-down* para generar escenarios (IPCC, 2007). Dicha aproximación plantea que los desastres son esencialmente resultado de la materialización del peligro en amenaza, es decir, del fenómeno meteorológico en sí. En este análisis, los esfuerzos para disminuir los problemas se basan en reducir el peligro con medidas de mitigación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) o adaptaciones tecnológicas para disminuir los impactos negativos del cambio climático (CMNUCC, Convención Marco de las Naciones Unidas, 2015). Por otro lado, se encuentran los trabajos enfocados en el estudio de la vulnerabilidad contextual, que se enfoca en los aspectos físicos, sociales, económicos y políticos del objeto de investigación vulnerable (O'Brien et al., 2008). Mediante este enfoque, se puede ubicar al factor que requiere acciones para disminuir la vulnerabilidad y con ello, las causas del

desastre. Este enfoque pone especial énfasis en la dinámica de los factores de la vulnerabilidad y los aspectos sociales que los modulan.

En la presente investigación la definición de vulnerabilidad corresponde al segundo enfoque y es la propuesta realizada por la Estrategia Internacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, 2004), la cual establece que la vulnerabilidad es una “condición determinada por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales, que aumentan la susceptibilidad de una comunidad a ser impactada por amenazas”. En este sentido, la vulnerabilidad ante cambio climático va a depender del fenómeno climático que se considere, ya que los sistemas vulnerables ante lluvias intensas no necesariamente son los sistemas vulnerables a temperaturas altas. Es así como para cada fenómeno climático se requiere hacer un análisis de vulnerabilidad. Además, es necesario que se consideren diferentes factores capaces de hacer a un sistema vulnerable ante un peligro determinado. A pesar de que existen muchos estudios sobre vulnerabilidad, pocos se concentran en asignarle un valor o cuantificarla. Sin embargo, es necesario pasar del “somos muy vulnerables” a “somos vulnerables en x medida”.

La evaluación de la vulnerabilidad generalmente se lleva a cabo a través de la construcción de indicadores para su caracterización (Cardona, 2012). Para esto, es importante contar con información temporal de cada factor de vulnerabilidad, ya que ésta, además de ser multifactorial, es dinámica (Magaña, 2012). Un análisis de vulnerabilidad cuantitativa, puede explicar la frecuencia y magnitud de los desastres al ubicar en el espacio a los sectores más vulnerables y establecer tendencias del

riesgo. La aproximación en la evaluación de vulnerabilidad permite una adecuada estimación del riesgo que explica los desastres acontecidos. Para ello se deben comparar los resultados del riesgo con los registros de impactos (morbilidad, mortalidad, desastres, pérdidas, siniestros, etc.), para así proponer medidas que disminuyan las afectaciones.

Se debe reconocer que no existe una metodología universalmente aceptada para evaluar vulnerabilidad o riesgo, pero es fundamental que como se hace con cualquier modelo, uno de riesgo deba explicar las observaciones, en este caso de impactos o desastres. Es así, como las propuestas metodológicas para estimar la vulnerabilidad deben llevar a un modelo de riesgo que explique los impactos, considerando los aspectos dinámicos y multifactoriales de éste.

1.8 Impactos del tiempo y clima sobre la población.

Los efectos del clima y tiempo sobre la población son cada vez mayores a pesar del conocimiento existente en la actualidad. El planteamiento naturalista que con frecuencia se utiliza para explicar los desastres, sigue siendo el predominante, el cual es reduccionista. En este planteamiento, el desastre es únicamente resultado de una amenaza. Sin embargo, esta visión de los procesos es inadecuada. Es por ello que se debe enfatizar en que tanto el fenómeno meteorológico peligroso, como las condiciones de vulnerabilidad son determinantes para que ocurra un desastre. El reto científico es establecer la importancia del peligro o de la vulnerabilidad en el riesgo, para establecer cómo pueden construirse ciudades más seguras.

El Centro de Investigación en Epidemiología y Desastres (CRED, por sus siglas en inglés), ha llevado a cabo estadísticas sobre desastres a nivel mundial. En un conteo del periodo 2007-2016 encontró que los impactos por clima más graves en los que las muertes y pérdidas económicas son mayores corresponden a las tormentas extremas y a las sequías. En el caso de pérdidas humanas, las tormentas e inundaciones son los eventos desastrosos que conllevan un mayor número de muertes, seguidas de las temperaturas máximas extremas (Below R. y P. Wallemacq, 2018).

En la Ciudad de México, la cantidad de personas expuestas a riesgo de inundación es alta, y aunque no se reportan muertes por este tipo de desastre, las afectaciones económicas y a la calidad de vida de las personas llegan a ser significativas (Fig. 4). Las soluciones al problema de inundaciones, propuestas hasta ahora (e.g., Túnel Emisor Oriente o Poniente) tienen un alto costo económico, por lo que se deberían considerar otras opciones, como son las soluciones basadas en la naturaleza.



Figura 4. Inundación en Tlalpan 2021.

Equipo vactor para desalojar el agua. Nota: Cortesía de Víctor Magaña.

1.9. Clima y desastre

Las temperaturas máximas extremas son un tema importante para la salud de las personas. En nuestro país, en ciudades como Mexicali y Hermosillo se llega a decenas de muertes anuales por calor. Pero otras ciudades como Ciudad Valles, Veracruz o Mérida, aunque no con un gran número de muertes, también se reportan afectaciones a la salud de las personas. En esas zonas, los aumentos en la temperatura, aunados a episodios de gran humedad parecen estar relacionados con

epidemias de dengue, lo que hace que las ondas de calor o episodios de gran humedad sean un peligro para la salud pública.

Los problemas que induce el cambio climático sobre la salud están relacionados a los aumentos en las temperaturas máximas y la vulnerabilidad de los grupos sociales. La contaminación en alimentos, agua, aire, aunados al clima, pueden dar cabida a la presencia de enfermedades diarreicas, cardiorrespiratorias o infecciosas (COFEPRIS, 2018), que inciden generalmente sobre niños, ancianos, enfermos con padecimientos crónicos, pobres y poblaciones aisladas (IPCC, 2007). Aunque se ha avanzado enormemente en reducir los problemas de enfermedades diarreicas, las afectaciones aún se manifiestan en los sectores de la población donde la pobreza o la carencia de servicios básicos se traduce en una gran morbilidad, y a veces mortalidad, principalmente en la población infantil.

A nivel local, la isla de calor urbana de la ZMVM y las ondas de calor han provocado que el confort térmico de la población sea alterado ya que las temperaturas extremas han llegado a ser de 33.9°C en un lugar en donde las temperaturas máximas oscilaban entre 28-30°C hasta hace tres décadas (Vargas and Magaña, 2020).

En cuanto a los problemas relacionados con las sequías meteorológicas, se tienen afectaciones a la población cuando el estrés hídrico en la vegetación y el manejo inadecuado del fuego se combinan para producir incendios forestales, siniestralidad en cultivos y ganado. Las ciudades, bajo una crisis hídrica cada vez más severa, se encuentra más cerca de sufrir sequías socioeconómicas de un gran impacto social. En el norte del país, la sequía de 2011-2013, provocó pérdidas millonarias en

agricultura, ganadería, incendios forestales dentro y fuera de áreas naturales protegidas, así como la escasez de agua en centros urbanos como la Ciudad de México (Domínguez, 2016). Cabe resaltar que estos desastres ocurrieron por la combinación de la sequía en sistemas muy vulnerables, principalmente por mal manejo de agua y una demanda creciente del recurso hídrico.

1.10 El caso de la Zona Metropolitana del Valle de México

La ZMVM, al ser uno de los centros urbanos más grandes del mundo, ha modificado significativamente su paisaje, y los efectos que esto ha tenido en su clima y el bienestar de las personas. Los cambios de uso del suelo, la concentración de medios de transporte y de población, y la falta de políticas públicas ambientales adecuadas, han afectado significativamente las temperaturas y el clima de la ZMVM.

Las ondas de calor alcanzan intensidades peligrosas por la existencia de una Isla de Calor Urbana (ICU) que ha incrementado la temperatura base promedio a más de 25°C. De esta manera, los meses de marzo, abril y mayo, son el periodo en el cual las altas temperaturas, pueden hacer que se alcancen más de 30°C lo que se considera peligroso para la salud de las personas. La alta estabilidad atmosférica de la estación, no sólo inhibe la formación de nubes, sino que resulta en la temporada de mayores niveles de contaminación atmosférica, por ozono y partículas. La combinación de estos elementos pone en riesgo la salud de las

personas de diversas formas. Sin embargo, las recomendaciones de autoridades para la población se educen a generalidades sobre cómo evitar el golpe de calor.

Los episodios de calor en la parte alta de la ciudad son de mucho menor magnitud que en la zona centro u oriente, lo que expone a mayores peligros a gran número de personas, ya que son también estas zonas las más densamente pobladas. Además, considerando el grado de verdor en las diferentes regiones de la zona metropolitana, existen diferencias en el paisaje y la condición ambiental que influyen en la magnitud del peligro y el riesgo. La zona oriente, con niveles de verdor bajos, experimenta de mayor forma los efectos de partículas que pueden afectar el sistema respiratorio de la gente y contaminar los alimentos que consumen.

1.11 La importancia de la vegetación urbana y los servicios ecosistémicos

La inclusión de elementos naturales dentro de las ciudades tales como árboles o jardines, es cada vez más necesaria, debido a los servicios ecosistémicos urbanos que pueden proveer en un modelo de expansión y crecimiento de las ciudades que tiende al deterioro ambiental. Los espacios naturales ya existentes requieren ser conservados y rehabilitados con planes de manejo y conservación a largo plazo, ya que son parte del territorio ciudadano que podrían crear condiciones para ahorrar recursos en la provisión de servicios públicos tales como agua. La opción de jardines infiltrantes, parques hídricos, o bosques urbanos puede mejorar la captación de agua de lluvia, reducir los niveles de contaminación del aire, y proporcionar servicios recreativos a la gente.

La recuperación de espacios verdes y construcción de infraestructura verde, también tiene que darse con sistemas naturales fuera del contorno urbano, pues estos desempeñan funciones básicas que permiten el desarrollo de la ciudad. Elementos como bosques y parques pueden prestar servicios de advección de aire fresco para regular temperaturas, filtrar contaminantes del aire, e interceptar agua de lluvia para evitar escorrentías e inundaciones. Mantener en buen estado la infraestructura verde que circunda a las metrópolis repercute en bienestar a niveles tanto locales como regionales, por lo que es importante su conservación y mantenimiento.

A medida que crecen las ciudades se han incrementado e intensificado las ICUs, con ello las demandas de energía eléctrica para instalar sistemas de enfriamiento como aires acondicionados o frigoríficos, que en cierta medida podrían ser prescindibles. Sin embargo, la demanda por estos artículos va en aumento con costos para la gente y el planeta.

1.12 Hipótesis

El riesgo climático para la Zona Metropolitana del Valle de México está en mayor medida relacionado con la intensificación de la Isla de Calor Urbana, la cual se debe no sólo a la expansión urbana, sino al modelo de crecimiento en el que la vegetación natural desaparece bajo un supuesto de que se debe aprovechar el espacio para infraestructura. La identificación de los procesos que muestran cómo la vegetación

natural puede reducir el riesgo, puede representar una oportunidad de gestión de riesgo climático y adaptación al cambio climático.

1.13 Objetivos

General:

Mostrar los procesos de construcción de riesgo climático en la ZMVM que han llevado a que la frecuencia y magnitud de los desastres afecten la calidad de vida de sus habitantes, principalmente por la pérdida de servicios ecosistémicos en la ciudad.

Particulares:

- Analizar cómo se dan los cambios en las temperaturas máximas extremas de la Zona Metropolitana del Valle de México en relación con el proceso de urbanización en diversos periodos desde finales del siglo XIX.
- Documentar cómo se han dado cambios en el ciclo de las lluvias en la ZMVM de forma que los eventos de lluvia extrema sean considerados peligrosos.
- Caracterizar la vulnerabilidad ante condiciones extremas derivadas de la isla de calor urbana de la Zona Metropolitana del Valle de México.
- Mostrar que una aproximación de riesgo climático resulta útil para hacer gestión preventiva del desastre.
- Mostrar que la vegetación en el modelo urbano de crecimiento, juega un papel fundamental en la construcción y deconstrucción de riesgo climático de la ZMVM.

1.14 Estructura de la tesis

El presente trabajo está desarrollado en 5 capítulos, el primero de los cuales aborda el planteamiento del problema, la motivación y reflexiones que llevaron a considerar el riesgo urbano construido por los cambios de uso del suelo que tienen lugar en una metrópoli como la del Valle de México. Al respecto, se presentan las bases del enfoque teórico-metodológico dentro del cual se enmarca la metodología para evaluar el riesgo climático.

En el capítulo dos se describen los datos y la metodología empleada en el tratamiento de los mismos, que permiten llegar a la construcción del modelo de riesgo ante condiciones climáticas extremas. Se consideran los datos de análisis para peligro y vulnerabilidad y, finalmente, se aborda el tema de riesgo crítico, al ser determinante en la ocurrencia de desastres.

El tercer capítulo presenta los resultados de la investigación que incluyen los resultados de la caracterización del peligro, la vulnerabilidad y el riesgo para el caso de temperaturas máximas y precipitación en la ZMVM. Para finalizar este capítulo, se mencionan otros riesgos que pueden presentarse como consecuencias de la expansión urbana.

En el capítulo cuatro se encuentra la discusión de los resultados para tratar de llegar a proponer medidas que integren la gestión de riesgo.

Finalmente, el capítulo cinco contiene las conclusiones y recomendaciones, reflexiones derivadas de la realización de esta investigación considerando la política mexicana en la materia seguida, las medidas estructurales para disminuir la problemática por incremento de peligro y vulnerabilidad, así como los sistemas de alerta temprana y la necesidad de su creación basados en el concepto de riesgo crítico.

En el capítulo 6 se encuentran las referencias y en el capítulo 7 los artículos que resultaron de este trabajo.

2.- Datos y metodología

Un análisis de riesgo requiere caracterizar peligro y vulnerabilidad. No existe una metodología universalmente aceptada de cómo cuantificar estos dos elementos, lo que abre la posibilidad de hacer propuestas metodológicas, aunque también puede llevar a que las aproximaciones se vuelvan ambiguas. Por ello, cuando se habla de riesgo, se piensa implícitamente en un modelo que simula la realidad. Esto nos lleva a no sólo hablar de riesgo, sino también de qué es la vulnerabilidad, y en este caso, de los impactos que la variabilidad del clima tiene. Así, se requiere cuantificar, peligro, vulnerabilidad, riesgo e impactos.

Por lo general, los datos de tiempo y de clima llevan a construir índices de peligro. La probabilidad de que un día de lluvia supere los 30 mm, o de que la temperatura máxima rebase los 30°C, permiten construir información del peligro. Cuando se hace referencia a un evento meteorológico extremo, se puede hablar de amenaza, es decir, una condición que pasó de ser probable a ser un evento medido. La vulnerabilidad requiere mayor creatividad para convertir información *proxi* en indicadores y eventualmente en un índice.

Las condiciones físicas, ambientales y socioeconómicas determinan la vulnerabilidad ante ciertos fenómenos meteorológicos y climáticos. Su caracterización para entender los factores que influyen en el riesgo deben reflejar la estructura multifactorial y dinámica de la vulnerabilidad que lleva a entender, la lenta pero continua evolución del riesgo. Los procesos de construcción de vulnerabilidad se pueden representar con indicadores que lleven a un índice. Las relaciones

estadísticas entre información sobre la actividad de amenazas permiten proponer modelos de riesgo capaces de explicar los desastres.

2.1. Información meteorológica

Gracias a una larga historia de mediciones del tiempo meteorológico se ha podido documentar cómo cambia el peligro meteorológico y climático en México. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) cuenta con una red de estaciones meteorológicas en todo el país, cuyas mediciones han quedado almacenadas en una base de datos pública. Los datos corresponden a mediciones de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación diaria, que en el caso del Valle de México y sus alrededores son los reportados por un promedio de más de 200 estaciones para el periodo 1920-2015 (Fig. 5). Aunque no siempre se cuenta con series continuas, pues se han suspendido muchas de ellas, o adolecen de periodos sin datos, los reportes son suficientes para caracterizar con cierto detalle espacial las condiciones de mesoescala (unos pocos kilómetros de resolución). Los datos se encuentran disponibles en la página web del SMN.

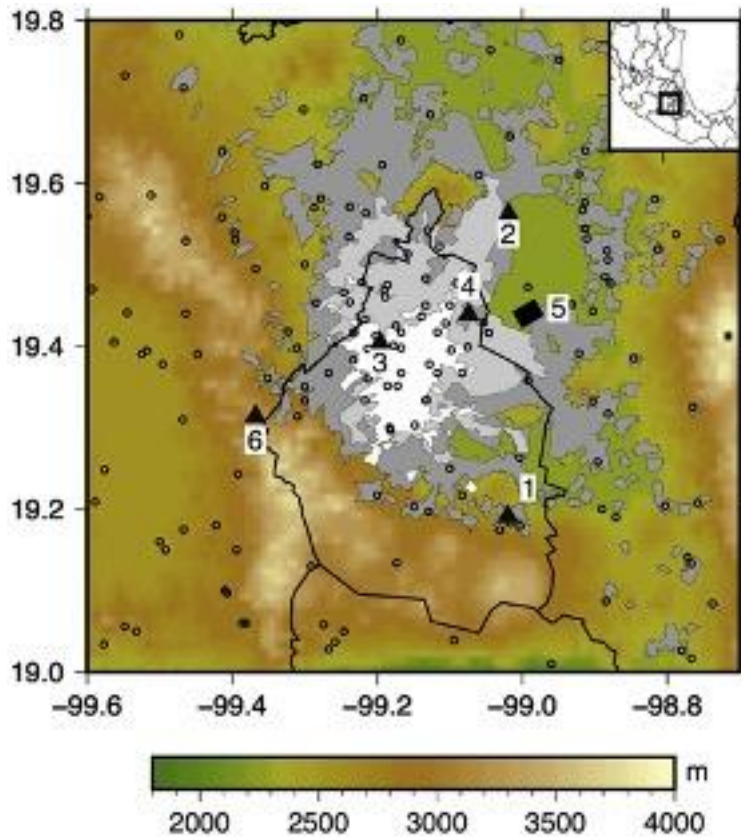


Figura 5. Dominio de estudio y evolución de la ZMVM

Entre 1950 (blanco), 1980 (gris claro) y 2005 gris oscuro. Los círculos pequeños corresponden a las estaciones meteorológicas (SMN) usadas en el estudio. 1) Milpa Alta, 2) Ecatepec, 3) Tacubaya, 4) Aeropuerto, 5) Texcoco, y 6) La Marquesa. Los sombreados en café y verde denotan la altura sobre el nivel del mar.

Para caracterizar los cambios del clima y de los peligros meteorológicos en el dominio de interés se utilizaron los datos de algunas estaciones con largos registros. Por ejemplo, la estación de Tacubaya, tiene los registros más largos en México, pues los reportes más antiguos son del año 1877 y continúan hasta hoy. Los datos han permitido explorar las relaciones entre el clima y los cambios de uso del suelo de la zona, que se reflejan en la respuesta de variables como temperatura de superficie y lluvia. En la zona de Tacubaya, al poniente del valle de México, se

asentaban haciendas a finales del s. XIX, que con el tiempo desaparecieron hasta convertirse en una zona altamente urbanizada. Su historia ambiental ha sido documentada ampliamente en cuanto a lo paisajístico (Ávila, 1999), (Bustamante y García, 1999) y en lo climático (Jáuregui, 2000). Otras estaciones de la ZMVM también cuentan con registros meteorológicos largos pues los datos van desde principios del siglo XX. Sin embargo, el número de estaciones meteorológicas va aumentando para alcanzar una gran cobertura de datos a partir de mediados del siglo XX, a la fecha, lo que permite reconstruir el clima de toda la ZMVM a partir de 1950 con datos diarios. Las series por estación se usaron para analizar tendencias y actividad de los extremos de temperatura y precipitación diaria. De igual forma, se analizaron las variaciones de muy baja frecuencia, las cuales se relacionaron con los cambios en el uso del suelo reportados para la región alrededor de la estación.

El número de estaciones en la ZMVM es relativamente alto por un largo periodo de más de sesenta años. Existen alrededor de 200 estaciones en el dominio de interés (FIG 2.1), lo que permite generar campos de temperatura y precipitación con resolución de 4 km x 4 km. Temporalmente, las estaciones reportan en promedio un 80% de los datos diarios del periodo 1960-2015. Con datos observados por estación se construyen mallas de campos meteorológicos diarios para el dominio de interés mediante un esquema de análisis objetivo de correcciones sucesivas (Cressman, 1959). El criterio para elegir estaciones meteorológicas con las cuales construir campos fue que contaran con datos completos para al menos el 80% del periodo. Muchas estaciones tienen series de datos con periodos interrumpidos lo que no facilita una caracterización adecuada del clima. Con tal criterio, se contó con

alrededor de 200 estaciones en promedio con datos completos. Así, el análisis fue realizado con registros que van desde el 1 de enero de 1960 hasta el 31 de diciembre de 2015.

Los datos meteorológicos incluyen información de radiosondeos hechos en el aeropuerto hasta 1998 y a partir de ese año, en la estación Tacubaya (Durre I., 2016: Integrated Global Radiosonde Archive V2, Dataset Description, Version 1.0 / July 29, 2016, National Centers for Environmental Information (NCEI). Los datos del aeropuerto permiten estimar humedad y estabilidad atmosférica, elementos clave para entender las tendencias de cambios en la ZMVM. Los datos a nivel mundial se encuentran disponibles en el sitio de la Universidad de Iowa.

2.2. Análisis objetivo de datos

Mediante un esquema de análisis objetivo (Cressman, 1959), se pasó de datos distribuidos irregularmente, en puntos donde se encuentran las estaciones meteorológicas, a mallas regulares de 4 km x 4 km de resolución espacial. El método no es una simple interpolación aritmética, sino que considera la calidad de los datos al hacer una comparación entre un campo preliminar y el reporte de estación.

George Cressman (1959) desarrolló una técnica de interpolación, de los datos de la estación en una cuadrícula de latitud y longitud definida por el usuario. El esquema realiza varias correcciones a un campo preliminar usando estimaciones de correcciones de los datos observados en estaciones contenidas en radios de

influencia con respecto del nodo de la malla, los cuales son consecutivamente más pequeños para aumentar la precisión de la corrección. El radio de influencia se define como el radio máximo desde un punto de la cuadrícula hasta una estación mediante el cual se puede ponderar el valor de la estación observada para estimar el valor en el punto de la cuadrícula. Las estaciones más allá del radio de influencia no influyen en el valor de un punto de la cuadrícula. En cada pasada, se calcula un nuevo valor para cada punto de la cuadrícula en función de su factor de corrección. Para cada una de estas estaciones, un error se define como la diferencia entre el valor de la estación y un valor obtenido por interpolación de la malla a esa estación. Luego, se aplica una fórmula ponderada por la distancia a todos esos errores dentro del radio de influencia del punto de la cuadrícula para llegar a un valor de corrección para ese punto de la cuadrícula. Los factores de corrección se aplican a todos los puntos de la cuadrícula antes de que se realice la siguiente pasada. Las observaciones más cercanas al punto de la cuadrícula tienen el mayor peso. A medida que aumenta la distancia, las observaciones tienen menos peso. La función de los pesos se da de la siguiente manera:

$$W = (R^2 - r^2) / (R^2 + r^2)$$

donde R = radio de influencia y r = distancia entre la estación y el punto de cuadrícula.

A medida que se ajusta el radio de influencia, los resultados se vuelven más representativos de los datos observados. El valor de análisis en cada punto de cuadrícula se calcula como el valor de análisis de la pasada anterior sumado a la

suma de los productos de los pesos calculados y la diferencia entre el valor real de la estación y el valor de fondo interpolado en la estación, dividido por la suma de los pesos.

El esquema de asimilación de datos tipo Cressman tiene

Ventajas:

- Simple y computacionalmente rápido (la velocidad depende del número de escaneos).
- Generalmente más preciso que otros métodos simples como la interpolación lineal.

Pero también tiene algunas desventajas pues:

- Puede ser inestable si la densidad de la cuadrícula es mayor que la densidad de la estación (es decir, más puntos de la cuadrícula que puntos de datos de la estación).
- Sensible a los errores de observación (los errores de observación aleatorios pueden generar características no físicas en el análisis).
- El análisis puede producir extremos poco realistas en los valores de la cuadrícula, especialmente cerca de los bordes del dominio espacial.
- No tiene en cuenta la distribución de las observaciones entre sí.
- La coherencia del resultado con las observaciones varía con la densidad de observación (estación).
- Los radios de influencia óptimos deben determinarse mediante ensayo y error.

Los datos obtenidos de estaciones meteorológicas distribuidas al azar fueron convertidos en una malla regular con el esquema de análisis objetivo descrito.

Para el presente análisis, el campo preliminar a ser corregido corresponde a la climatología mensual de temperatura máxima y mínima obtenida del *North American Regional Reanalysis (NARR)* (NCEP, 2005). Los campos NARR originales de 32 x 32 km fueron interpolados a una malla de 4 x 4 km. En el caso de la temperatura, ésta fue modificada para incluir el efecto de las variaciones de temperatura con la altura, usando la constante del gradiente adiabático húmedo de 6.5°C/Km, considerando un campo topográfico de resolución espacial de 1km x 1km, como el disponible en el *International Research Institute (IRI) for Climate and Society*, (Hastings y Dunbar, 1999). Para validar los campos de temperatura se compararon los datos diarios de temperatura con reportes de las estaciones comparando la coherencia entre puntos de malla y las observaciones. La mayoría de las estaciones mostraron una correlación de 0.8 o más sobre el dominio de trabajo, lo que indica una representación adecuada del campo de temperatura usando la información de la malla.

Para el análisis de datos de temperatura del suelo se utilizó información de satélite referente a la temperatura mediante imágenes LANDSAT. La resolución espacial de estos datos es de 30 m, aunque temporalmente solo se cuenta con algunas imágenes, las cuales corroboran que las temperaturas más elevadas se presentan en zonas de asfalto como avenidas o las pistas del aeropuerto. Si bien, la temperatura del suelo no es igual que la temperatura del aire a 2 m, permite

contrarrestar los efectos que tiene el uso del suelo sobre la temperatura, e identificar la estructura de la Isla de Calor Urbana (ICU).

Para caracterizar la vulnerabilidad se utiliza información sobre las condiciones físicas, ambientales, económicas y sociales. Dicha información se obtiene esencialmente de los registros oficiales del gobierno mexicano a través del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). El uso de indicadores socioeconómicos, obtenidos durante el censo oficial en México de 2000 y 2010 (INEGI, 2013), permite caracterizar la vulnerabilidad de las personas a las olas de calor. Por ejemplo, su vulnerabilidad puede depender de si tienen acceso a servicios médicos básicos (Reyes et al., 1998) o educación para conocer estrategias de autogestión de riesgos (Cid Ortiz, et al., 2012). El hacinamiento en los barrios, la mala calidad del agua para uso y consumo humano, la eliminación inadecuada de excretas y las malas condiciones higiénicas de las viviendas y los espacios públicos también se han considerado importantes factores de vulnerabilidad que pueden inducir las enfermedades diarreicas agudas. Los datos socioeconómicos del INEGI (2018) se han utilizado como proxy para la construcción de indicadores de vulnerabilidad sobre acceso a agua potable, servicios de salud, densidad de población, acceso a servicios domésticos (como refrigeradores) y nivel de alfabetización.

También se utilizaron datos de satélite MODIS, correspondientes al parámetro llamado *Enhanced Vegetation Index (EVI)*, para establecer la dinámica de la cobertura vegetal en zonas urbanizadas y sus alrededores. Los datos de EVI cubren el periodo 2000-2015 y reflejan de forma adecuada los cambios en la vegetación, la

urbanización e indirectamente los cambios en los servicios ecosistémicos. Los datos EVI tienen una resolución de 250 m X 250 m y se encuentran disponibles en los archivos de datos de IRI (Huete et al., 2002). La vegetación urbana y su dinámica son elementos clave para establecer cómo cambian servicios ecosistémicos urbanos como la regulación climática o hídrica (FAO, 2021). Los valores bajos de EVI (menos de 0,2) se han relacionado con áreas de cubierta vegetal baja o suelo desnudo. Los valores moderados (0,2-0,6) representan arbustos y pastizales o vegetación escasa, mientras que los valores altos (más de 0,6) indican bosques templados y tropicales. Temporalmente, los valores más altos de EVI se observan a fines de septiembre, luego del final de la temporada de lluvias en México (Vargas y Magaña 2020).

La información sobre los impactos relacionados con el clima, como las inundaciones, se ha obtenido del sitio web de DesInventar (2018). Los datos sobre la infraestructura urbana (sistema de drenaje) se han obtenido de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y del Sistema de Agua de la Ciudad de México (SACMEX). Breña-Pujol (2019), ha resumido las principales características de la Infraestructura Hidráulica de la ZMVM.

La Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS, 2018) reporta casos de egresos hospitalarios de personas que han sido afectadas directa o indirectamente por la enfermedad diarreica. Los informes semanales sobre niños entre 0 y 5 y entre 5 y 14 años afectados por Enfermedades Diarreicas Agudas (EDAs) se utilizan como medida del impacto de los períodos cálidos. Esta información se compara con las estimaciones de riesgo climático para la ZMVM.

2.3 El peligro meteorológico en la Zona Metropolitana del Valle de México

En un estudio de riesgo se requiere una adecuada caracterización del peligro. Para ello es necesario saber en qué punto un elemento climático puede convertirse en peligro o en peligro crítico. En el caso de temperatura, se tiene referencia de un valor umbral que afecta la salud a la población, como por ejemplo el índice de Calor o de Confort Humano. El índice de calor es una medida de qué tan caliente se siente realmente cuando se tiene en cuenta la humedad relativa con la temperatura real del aire. Para encontrar la temperatura del índice de calor, se consulta una Tabla de índice de calor (NOAA, 2020).

Jáuregui (2009), determinó como temperatura extrema para la Ciudad de México y su área metropolitana, 30°C o más, ya que ello representa incomodidad térmica para los habitantes de la región. La zona de estudio se encuentra ubicada en una cuenca cerrada con diferencias altitudinales que van de los 2200 a los 2900 msnm y grandes contrastes climáticos. La altitud es uno de los factores que incide en las características heterogéneas de la cuenca, por consiguiente, en las partes altas, la temperatura y la precipitación presentan valores diferentes a los que se pueden observar en la parte baja.

En cuanto a las temperaturas máximas, generalmente se presentan entre los meses de primavera y principios de verano, es decir, abril, mayo y junio (Fig. 6). En casos extremos, como cuando se presenta El Niño, la ciudad ha registrado temperaturas

de hasta 34°C como en 1998, lo cual es extraordinario. Sin embargo, las temperaturas arriba de 30°C, consideradas como extremas en la ZMVM, pueden ser un peligro para la salud de la población ya que, con esta temperatura el confort disminuye y, en combinación con otros factores de vulnerabilidad, pueden resultar en riesgo de problemas de salud, como un golpe de calor, insolación e incluso hasta la muerte (Harlan et al., 2006). La probabilidad de temperaturas máximas arriba de 30°C, se considera factor de peligro, específicamente en esta zona.

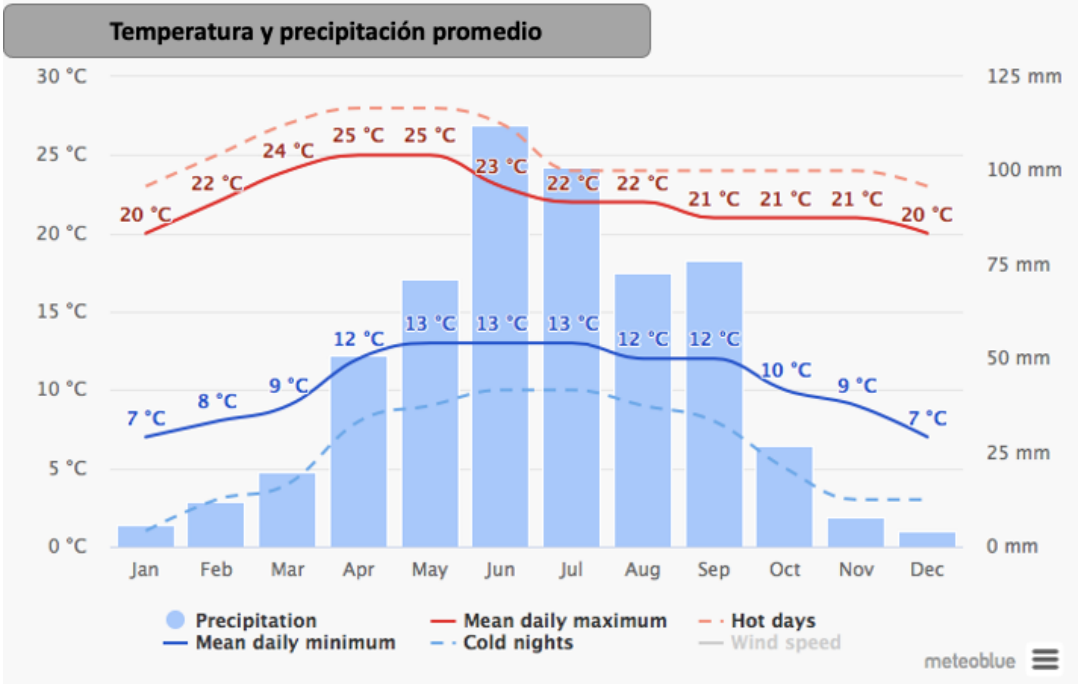


Figura 6. Climograma de la Ciudad de México

Fuente: Meteoblue

En el caso de temperaturas mínimas, el valor mínimo extremo de 5°C, puede considerarse factor de peligro para la salud. En general, esta temperatura es baja, pero el grado de daño que puede ocasionar dependerá de las condiciones en las que se encuentre la población y de su vulnerabilidad. De manera indirecta, la ocurrencia de estas temperaturas induce a hogares en condiciones de precariedad

al uso de fogones para calentar la casa habitación, por lo que se genera monóxido de carbono que puede causar intoxicación o incluso la muerte. Sin embargo, estas condiciones se presentan con poca frecuencia. Por otro lado, y también de manera indirecta, cuando llega a caer nieve en las partes altas del valle, resulta en una atracción turística que congrega gente y, al no tener práctica en el manejo sobre carreteras con hielo, han ocurrido accidentes automovilísticos.

Por otra parte, la precipitación en la ZMVM se ha convertido en un peligro meteorológico, pues cada temporada de lluvias, las precipitaciones dan lugar a inundaciones y sus consecuentes pérdidas económicas. Jáuregui (2000), documentó que una tasa de precipitación arriba de 20 mm/hr, podía causar inundaciones por lo que este valor de lluvia puede considerarse peligro crítico. Por lo general, las lluvias de verano en el Valle de México corresponden a tormentas convectivas de corta duración por lo que una lluvia de 20 mm/día, como evento peligroso, se puede asociar con una lluvia de 20 mm/hr.

Para caracterizar las temperaturas extremas se parte por lo general, del cálculo del percentil 90 o 95 por periodos, y de esta manera se conocen los cambios a través del tiempo. Así, por medio de una distribución de probabilidades, puede conocerse no solo la media de los datos, sino los valores extremos tanto máximos como mínimos y su probabilidad de ocurrencia. Cabe hacer hincapié en que es necesario abandonar la idea de periodos de retorno para calcular la ocurrencia, ya que este procedimiento no aplica en series no-estacionarias. Por ello, es más conveniente considerar cambios decadales en los percentiles.

El peligro está dado por un valor de probabilidad. El periodo de datos de más de sesenta años, permite calcular las probabilidades en tres periodos de alrededor de veinte años, y de esa forma establecer cómo cambia. Los percentiles 90 o 95 proveen probabilidades estándar de 10 y 5% de ocurrencia de condiciones por encima de un valor umbral. El cambio en el tiempo de ese valor percentil o valor umbral refleja también los cambios en el clima que resultan en cambios en el peligro. Por ello, se determinan cambios en el percentil, pero sobre todo en el umbral considerado de peligro crítico que son temperaturas arriba de 30°C o precipitaciones por encima de los 20 mm/día.

2.4 Vulnerabilidad: una propuesta para su cuantificación

La vulnerabilidad a condiciones de tiempo o clima peligroso, es un elemento dinámico que varía en diversas escalas de tiempo. Por ejemplo, al construir una casa, los ocupantes pueden modificar su vulnerabilidad ante temperaturas máximas extremas, dependiendo del material y diseño utilizados, o de los equipamientos que se implementen para mantener el confort. Es por lo que caracterizar la vulnerabilidad requiere pensar en el peligro y el impacto esperado. No es preciso hablar de vulnerabilidad al clima de forma general, sino que se debe pensar en la vulnerabilidad a una condición específica (onda de calor, granizada, lluvia intensa). Por ello, hablar de vulnerabilidad al cambio climático sin expresar adecuadamente la manifestación de éste en un peligro específico no lleva a estimaciones de riesgo. Por ello, es importante definir con precisión a qué se es vulnerable.

De acuerdo con Neri y Magaña (2016), al realizar un análisis de vulnerabilidad es fundamental responder a tres preguntas ¿Qué o quiénes son vulnerables? (Objeto de estudio) ¿A qué son vulnerables? (el peligro) y ¿Por qué son vulnerables? (Factores de vulnerabilidad). La última pregunta es clave para identificar a los elementos que generan la vulnerabilidad del objeto de estudio. La población de la ZMVM, el objeto de estudio, ante temperaturas máximas extremas, mayores a 30°C, se debe entre otras cosas a la edad, el acceso a servicios, la condición económica, y otros factores.

La urbanización desde la segunda mitad del siglo XX en el Valle de México, ha sido caótica y mal planeada, por lo que representa un factor vulnerabilidad, pero que además aumenta el peligro, al generar una ICU. Para hacer una caracterización del grado de urbanización y sus cambios en el tiempo se utilizaron datos de crecimiento urbano obtenidos de INEGI (2010) y de características de población (CONAPO, 2010). Desde mediados del siglo XX, la ZMVM experimentó un rápido crecimiento que resultó en una de las ICUs más intensas del continente.

En el presente marco conceptual se cuantifica la vulnerabilidad ante temperaturas máximas y precipitaciones extremas, para lo cual se utilizaron datos socioeconómicos de INEGI (2000 y 2010), como son: población por grupos de edad, condiciones de las viviendas, niveles escolares y acceso a servicios de salud. Estos datos se obtuvieron a nivel Área Geo Estadística Básica (AGEB), con el objetivo de

tener mayor resolución espacial en el momento de validar el modelo de riesgo propuesto.

En términos de vulnerabilidad ambiental se incluye el grado de vegetación o infraestructura verde presente en la zona de estudio. Entre menos vegetación, menos servicios de regulación térmica, mayores escurrimientos, menos infiltración, etc. Es decir, la vegetación es clave para reducir la vulnerabilidad. Para obtener esta información se recurrió a datos satelitales, del Enhanced Vegetation Index o EVI por sus siglas en inglés (IRI, 2018).

Los datos de vulnerabilidad se normalizan para convertirlos en indicadores y su combinación lleva a la creación de un índice de vulnerabilidad (Neri y Magaña, 2016), el cual se tiene en un rango de valores de 0 a 1. Este rango de riesgo permite hablar de vulnerabilidad muy baja, baja, media, alta y muy alta. Cuando el peligro se combina con la vulnerabilidad, a través de un producto, se obtiene una medida del riesgo.

2.5 Riesgo climático: peligro y vulnerabilidad

El riesgo climático puede ser definido como la probabilidad resultante del producto del peligro por la vulnerabilidad. En el caso de episodios de calor, el riesgo se calculó con los valores de probabilidades de temperaturas arriba de 30°C y el índice de vulnerabilidad resultado de indicadores de acceso al agua, edad de la población, acceso a servicios y condición de la vegetación urbana. Los valores de riesgo se calculan en una malla para que, espacialmente, se puedan determinar las áreas con mayor riesgo para posteriormente, comparar con información sobre los impactos.

En el caso de riesgo por ondas de calor, la medida de impacto para temperaturas máximas extremas fueron los casos de enfermedades diarreicas agudas en población vulnerable, caracterizada con datos de EDAs en las semanas epidemiológicas (COFEPRIS, 2018) presentadas por alcaldía o delegación.

De esta manera, a través de los impactos se valida el modelo de riesgo propuesto, al encontrar ubicación de los impactos y niveles de riesgo. Una vez validado el modelo, se infiere que los factores de vulnerabilidad propuestos son correctos y por consiguiente, las estrategias de gestión de riesgo ante temperaturas máximas extremas o precipitación deben enfocarse en disminuir la vulnerabilidad resultante en relación con los factores utilizados en el modelo. La comparación entre evaluaciones de riesgo e impactos, en el tiempo y el espacio provee una medida de lo adecuado de las estimaciones de riesgo. Un modelo aceptable puede ser usado en la generación de escenarios y la gestión del riesgo de desastres.

2.6 Riesgo crítico y desastres

Una ventaja de realizar un análisis de riesgo por métodos de cuantificación o parametrización es que se puede determinar en qué valor las probabilidades de riesgo de desastre son inaceptables. Al respecto “...los desastres pueden considerarse una “materialización del riesgo”, lo que significa que, en ocasiones, éste alcanza niveles por encima de un valor crítico y las probabilidades de desastre son demasiado altas...” (Magaña, 2012). Por valor crítico entendemos un valor que conlleva afectaciones a la seguridad de las personas o la infraestructura, con

pérdidas económicas significativas, alta morbilidad, o afectaciones al ambiente. Cada lugar o sistema debe determinar cuál es el valor crítico de aceptabilidad de riesgo.

El sistema de estudio puede enfrentar un alto peligro con una baja vulnerabilidad y por tanto, de bajo riesgo. Pero en ocasiones, el riesgo puede alcanzar un nivel que puede llegar a desencadenar un desastre. En la zona de estudio aún estamos lejos de llegar a un punto de desastres fatales por riesgo a temperaturas extremas, a diferencia de otras urbes como Mexicali o Hermosillo, donde se registra mortalidad asociada a temperaturas por arriba de 40°C (Díaz et al., 2014). Sin embargo, para el Valle de México, el impacto que se puede producir es el golpe de calor, para lo cual ya existen alertas en medios de transporte público. En la lista de enfermedades del Boletín Epidemiológico que publica la Secretaría de Salud, aún no se tienen registros de muerte por calor en el caso de la ZMVM. Por ello, se optó por utilizar los reportes de egresos hospitalarios por EDAs, que en la literatura son mencionadas como posibles repercusiones a las altas temperaturas (Checkley et al., 2000), (Riojas et al., 2006).

Finalmente, se sabe que los cambios en el uso de la tierra pueden tener consecuencias negativas al aumentar el riesgo climático, pero la identificación de las causas de dicho proceso también puede servir para definir estrategias de gestión de riesgos. La información sobre las características del proceso de urbanización y la actividad humana relacionada puede ayudar a definir políticas de desarrollo urbano sostenible (Chen et al, 2008). El rápido proceso de urbanización en la ZMVM se produce hacia las partes altas de la cuenca, por lo que los escurrimientos

aumentan y con ello el riesgo de inundación en las partes bajas de la ciudad. Tal problema se ha tratado de resolver con infraestructura hidráulica, pero la recuperación de servicios ambientales podría reducir el riesgo. Este tipo de riesgo se trata en la parte final del trabajo.

3. Resultados

3.1 La expansión urbana de la Zona Metropolitana del Valle de México

Desde la segunda mitad del siglo XX, la Ciudad de México ha crecido en superficie y en población de manera acelerada. De 1960 a 2010 la población se cuadruplicó al pasar de 5 millones de habitantes a más de 20, mientras que la superficie pasó de ser de 23 mil hectáreas a cerca de 163 mil durante el mismo periodo (CONAPO, 2010). Este proceso de crecimiento estuvo relacionado con la política económica de centralización que provocó migración hacia la ciudad y con ello, la construcción de viviendas en forma masiva y desorganizada, con el establecimiento de asentamientos ilegales, principalmente en el Estado de México a partir de la década del 60, cuando la ciudad comenzó a expandirse hacia municipios adyacentes y se le reconoció como metrópoli (Delgado, 1988).

En las décadas subsecuentes, la creación de una industria moderna hacia el norte de la ciudad fue detonante para la expansión de la urbe. Cuautitlán, Atizapán, Ecatepec, municipios del Estado de México que colindan con el norte de la Ciudad de México, fueron incorporándose a la ciudad, y las fronteras entre Estado de México y Ciudad de México, se tornaron poco claras. Hacia el sur, el detonante del crecimiento y expansión urbana fue la creación de infraestructura para la movilización y alojamiento de los participantes en los juegos Olímpicos de 1968, lo que implicó también asentamientos de trabajadores en lo que se conoce como Ciudad Nezahualcóyotl.

Para la década de los 90 comienza a incrementarse la población en la periferia del área metropolitana, incluso en municipios pertenecientes al Estado de Hidalgo, mientras que el crecimiento demográfico dentro de la ciudad es negativo (Aguilar, 2012). Un aspecto a considerar en este periodo es la regulación estricta del uso del suelo en el denominado “Suelo de conservación”, decretado en 1987. Tal decreto establece una región al sur de la Ciudad de México como área de conservación dadas sus características bióticas que funcionan como un sistema que proporciona servicios ecosistémicos para todo el Valle de México. Esta medida disminuyó el crecimiento urbano hacia el sur.

A comienzos del nuevo milenio la metrópoli comienza a crecer de manera desfragmentada, con muchos polígonos pequeños ubicados en la periferia, principalmente en el Estado de México (Fig. 2). En este periodo la urbe ya está integrada por las 16 delegaciones del Distrito Federal y más 58 municipios del Estado de México e Hidalgo. Las zonas periféricas del norte y oriente presentan las tasas de crecimiento poblacional más altas (e.g., Ecatepec), con un nivel socioeconómico marginal, ya que en estas áreas el suelo es más barato pero la dotación de servicios básicos es insuficiente.

El crecimiento de la Zona Metropolitana conlleva no sólo cambios socioeconómicos en la capital del país, sino también importantes cambios ambientales, principalmente relacionados al clima al construirse la llamada Isla de Calor Urbana (ICU) que se manifiesta principalmente como un aumento en la temperatura ambiente.

3.2 El clima de la Zona Metropolitana del Valle de México

Existen varios estudios del clima de la Ciudad de México entre los que destacan los realizados por el Dr. Ernesto Jáuregui (1996, 1997, 2000, 2009). La ZMVM constituye un ejemplo importante de cómo se ha construido una Isla de Calor Urbano en los trópicos (Oke, et al., 2017), pues su dinámica resulta ejemplo de crecimiento urbano en otras partes de México y Latinoamérica.

Debido a las condiciones fisiográficas de la ZMVM, el clima presente grandes contrastes, principalmente entre las zonas bajas del Valle y las partes montañosas. Los gradientes de temperatura y precipitación se manifiestan con claridad en diversos análisis del ciclo anual del clima. Los rangos en los que oscilan las variables climáticas derivadas del gradiente orográfico y del nivel de urbanización se reflejan en temperaturas altas en el centro del Valle de México que disminuyen hacia las partes altas del poniente. Las lluvias también muestran un fuerte gradiente dado que el efecto orográfico induce precipitaciones intensas al poniente de la ciudad. El centro de la metrópoli se mantiene con temperaturas más elevadas a lo largo del año, lo que puede resultar en condiciones de confort inadecuadas, que llegan a afectar la salud. Durante el final del periodo de estiaje, las temperaturas máximas registradas en el centro de la ciudad pueden rebasar los 30°C, aunque durante una onda de calor la temperatura máxima puede superar los 33° C.

La expansión urbana, dominada por el concreto, registra temperaturas de suelo aún mayores a los 33°C y en días soleados es mayor en zonas donde domina el asfalto. Dicha condición contrasta con las zonas donde se conserva la vegetación, como en el Bosque de Chapultepec, donde la sombra que brindan los árboles crea un ambiente fresco.

3.3 Isla de Calor Urbana de la ZMVM

Las temperaturas máximas de la ZMVM han aumentado significativamente durante los siglos XX y XXI. En la parte oeste de la ciudad, en Tacubaya, la temperatura máxima media anual se ha incrementado de 22°C a aproximadamente 25°C en alrededor de 100 años (Fig. 7). Este incremento de temperatura se da como respuesta a los cambios de uso del suelo que han tenido lugar alrededor del sitio, pasando de suelo con vegetación a suelo totalmente urbano. Cuando la tendencia de la temperatura máxima en la zona de Tacubaya se compara con la de zonas cercanas que han mantenido su carácter rural, se aprecia que el efecto de urbanización es el forzante climático de cambio en la ZMVM.

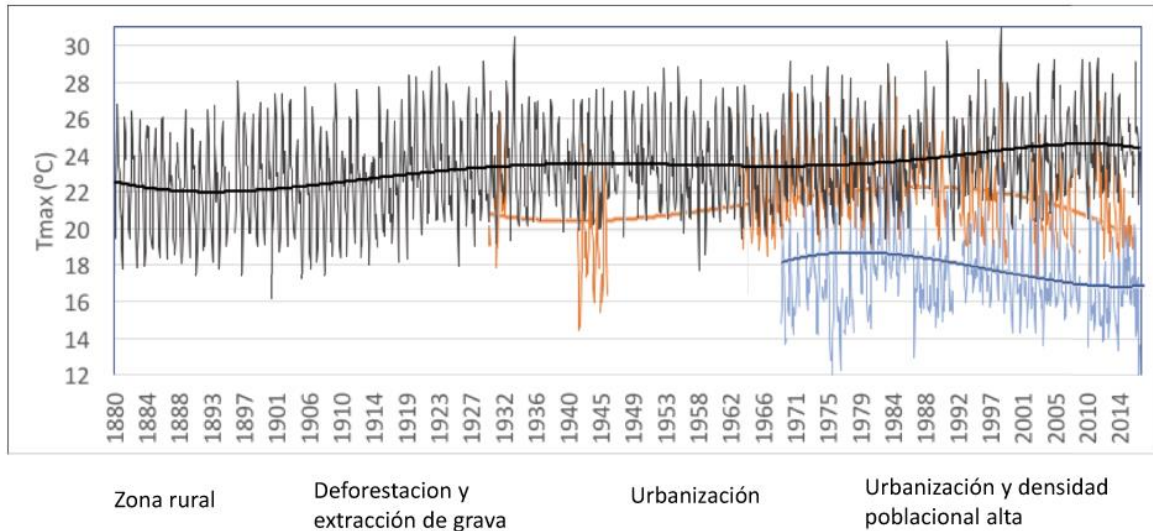


Figura 7. Temperatura máxima promedio en Tacubaya y usos del suelo.

Series de tiempo de temperatura máxima promedio (1878-2016) (línea delgada negra), estación Milpa Alta (1929-2006) (línea delgada naranja) y estación de La Marquesa (línea delgada azul). Las líneas sólidas más fuertes, corresponden a la versión suavizada o a las variaciones de baja frecuencia, de la temperatura máxima observada para cada estación. Los períodos de cambios importantes en el uso del suelo cercanos a la estación Tacubaya se indican bajo la gráfica (Tomada de Vargás y Magaña 2020).

En el poniente del Valle de México, a finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, la temperatura máxima cambió de 22°C a 23°C, al darse un proceso de deforestación y extracción de materiales para la construcción en la zona. Entre 1920 y 1965, la temperatura máxima se mantuvo relativamente estable mientras Tacubaya mantuvo un carácter de un pueblo aledaño a la ciudad de México. Sin embargo, la rápida urbanización ocurrida en la década de 1970, resultó en pérdidas de vegetación y un cambio de temperatura entre 24 y 25°C. Desde entonces, la temperatura ha mantenido una ligera pero constante tendencia al aumento. Es de esperarse que, con un nuevo modelo urbano en la zona, en donde priven los grandes edificios, la ventilación disminuya, el aire caliente se estanque y las

condiciones de incomodidad térmica aumenten. Pero para mostrar tales cambios es necesario recurrir a los datos medidos y no sólo a la percepción de las personas.

El proceso de calentamiento en la parte oeste de la ZMVM muestra que el forzante climático relacionado al cambio de uso del suelo ha tenido importantes efectos en el clima local, tal y como ocurre en la mayoría de las grandes ciudades del mundo (Oke et al., 2017). Un patrón similar de pérdida de vegetación e incremento de la temperatura máxima media, puede observarse sobre la mayor parte de la ZMVM. En regiones rurales como en La Marquesa o Milpa Alta, de un carácter rural, el incremento en las temperaturas máximas en décadas recientes ha sido relativamente pequeño (menos de 1°C en 50 años) principalmente debido a la conservación de espacios con vegetación natural. Estos contrastes implican que la urbanización y la pérdida de vegetación natural han creado la ICU de la ZMVM.

Las temperaturas máximas de la ZMVM son usualmente mayores entre marzo y mayo (primavera), antes del comienzo de la estación lluviosa. El gradiente orográfico del dominio hace posible que se presenten temperaturas superficiales más bajas en las partes sur y oeste de la región, que son las partes montañosas, generando el contraste térmico característico de una ICU.

La superficie urbana creció rápidamente durante las últimas décadas, resultando en aumentos de temperatura superficial en el centro-norte de la Ciudad de México. Espacialmente, la ICU coincide aproximadamente con la isoterma de 26°C, la cual se expande a medida que la urbe crece (Fig.8).

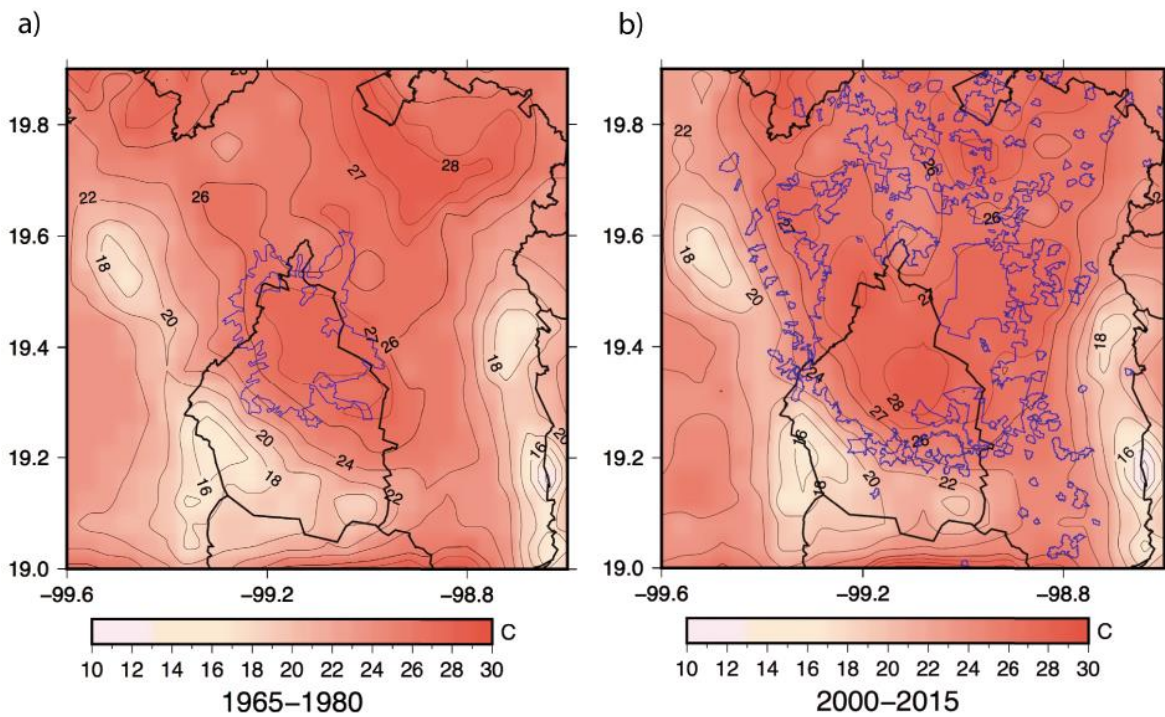


Figura 8. Temperatura máxima

Temperatura máxima media (°C) para Marzo-Abril-Mayo en la ZMVM, para los periodos a) 1965-1980 y b) 2000-2015. La línea azul indica la extensión urbana en 1980 y 2010, respectivamente.

Para el periodo 1965 - 1980 la mayor urbanización se localizó en la parte central del Valle de México, donde el promedio de la temperatura máxima de primavera era de alrededor de los 27°C (Fig. 8a). Conforme la ciudad creció la ICU se expandió y la isoterma de 26°C cubrió un área mucho mayor, principalmente hacia el noreste y noroeste de la ciudad, con el patrón de la ICU similar a la expansión urbana de la zona (Fig. 8b). En la parte este de la ZMVM, las temperaturas máximas medias han alcanzado más de 28°C en el área urbanizada, en una tasa de calentamiento de más de 1°C en 30 años.

En el centro y norte de la ZMVM, en algunos días e incluso en algunos meses, las temperaturas máximas pueden ser mayores de 30°C, particularmente en años recientes, lo que se convierte en un peligro meteorológico y conduce a un riesgo climático para la población vulnerable. El número de episodios de 30°C o más se han incrementado en varias partes de la ZMVM, como en la estación de Tacubaya, donde el número de ondas de calor ha aumentado de 2 a 3 por década a comienzos del siglo XX, a más de 20 por década al final del mismo siglo (Jáuregui, 2009).

El incremento en la temperatura depende de las características del proceso de urbanización (Oke et al., 2017). El nivel de conservación de vegetación natural es un elemento importante para modular las temperaturas (Bolund y Hunhammar, 1999). Cuando se comparan los cambios en la temperatura máxima en dos paisajes diferentes de la ZMVM, se puede estimar el papel de la vegetación natural. Por ejemplo, en Ecatepec, una zona densamente poblada en la parte noreste de la región de estudio, la vegetación es escasa, pues el concreto, acero, vidrio y hormigón, dominan el paisaje. Aquí, el aumento de la media de temperaturas máximas derivadas de los efectos de la ICU, es de alrededor de 3.2°C en 30 años (Fig. 9a). Por otro lado, en Milpa Alta, una zona rural menos poblada al sur de la ZMVM, la vegetación natural y la agricultura han sido conservadas, con lo que el aumento en la temperatura máxima es menor (1°C en 30 años) (Fig. 9b). La vegetación natural regula la temperatura media a nivel local e incluso regionalmente. Sin embargo, en Milpa Alta o Ecatepec, y en la mayor parte de la ZMVM, se han dado incrementos de alrededor del 5% en la frecuencia de eventos de 30°C. Esto

se debe a que en un ambiente más caluroso, temperaturas mayores a 30°C se vuelven más frecuentes y con ello, los registros de ondas de calor van en aumento.

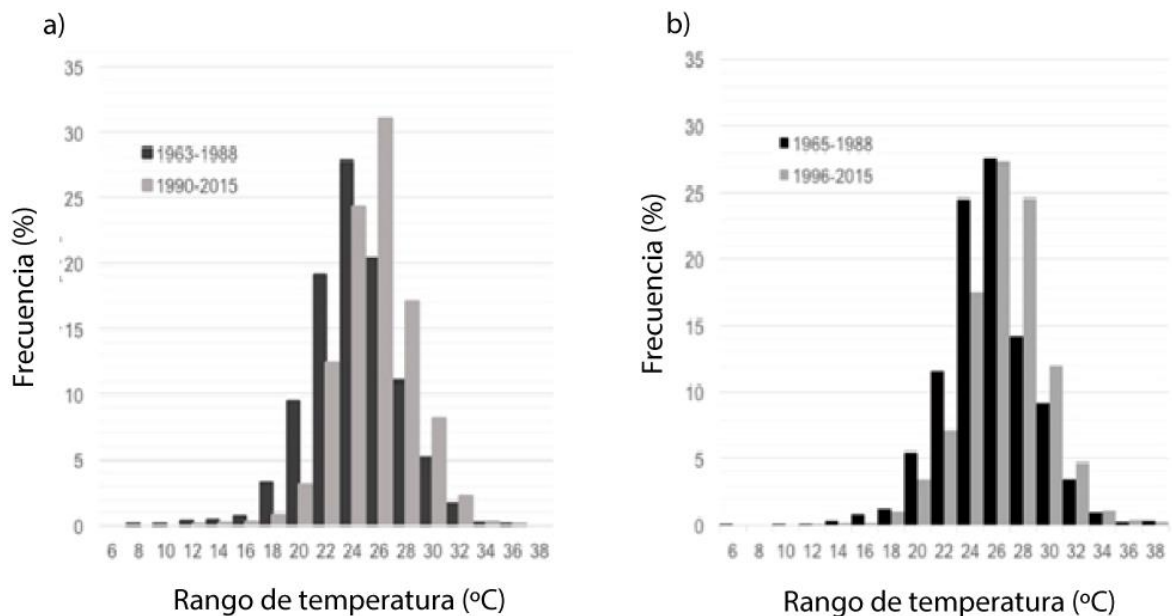


Figura 9. Histograma de temperatura máxima

Histograma a) Ecatepec, entre 1963 y 1988 (barra negra) y entre 1990 y 2015 (barra gris) y b) Milpa Alta, para 1965-1988 (barra negra) y 1966-2015 (barra gris).

Desde una perspectiva de riesgo, el peligro por ondas de calor está aumentando en relación con la expansión e intensificación de la ICU, y con mayor frecuencia se llega a valores de peligro crítico, lo cual puede afectar zonas en donde la vulnerabilidad a este elemento es alta o muy alta.

3.4 Pérdida de vegetación y temperaturas máximas

El modelo de expansión urbana en ciudades mexicanas se relaciona con deforestación a un ritmo acelerado, pues los desarrolladores inmobiliarios prefieren incrementar las áreas construidas que conservar áreas naturales. Dado que el nivel de calentamiento por la ICU depende del nivel de vegetación existente, es

importante documentar cómo cambia éste, conforme crece la ciudad. A través del índice de vegetación mejorado o EVI, es posible distinguir la extensión urbana en regiones donde la vegetación ha cambiado durante décadas recientes. La estimación del EVI puede asociarse a áreas boscosas o arboladas (Hussein et al. , 2017), las cuales, para propósitos de clima urbano, son importantes para determinar donde la evapotranspiración puede mitigar la intensidad de la ICU (Ballinas, M. and V. Barradas, 2016). En la ZMVM, los valores del EVI menores a 0.1 casi corresponden a la presencia mínima de árboles y de vegetación en general, que se da en áreas altamente urbanizadas (Fig. 10). Durante el siglo XXI, la expansión urbana hacia el norte produce un cambio a la baja en los valores de EVI, principalmente hacia el norte y el oriente de la ZMVM. Incluso en la zona de Chapultepec, al poniente de la CDMX, el nivel de verdor ha decrecido al ceder a las presiones del negocio inmobiliario. También hacia la zona de conservación, en el sur de la CDMX, la zona con vegetación va decreciendo conforme la urbanización crece. Este efecto es claro hacia la zona de Tláhuac y Xochimilco. Todo esto, tiene un efecto, tanto en la regulación climática, como en la regulación hídrica.

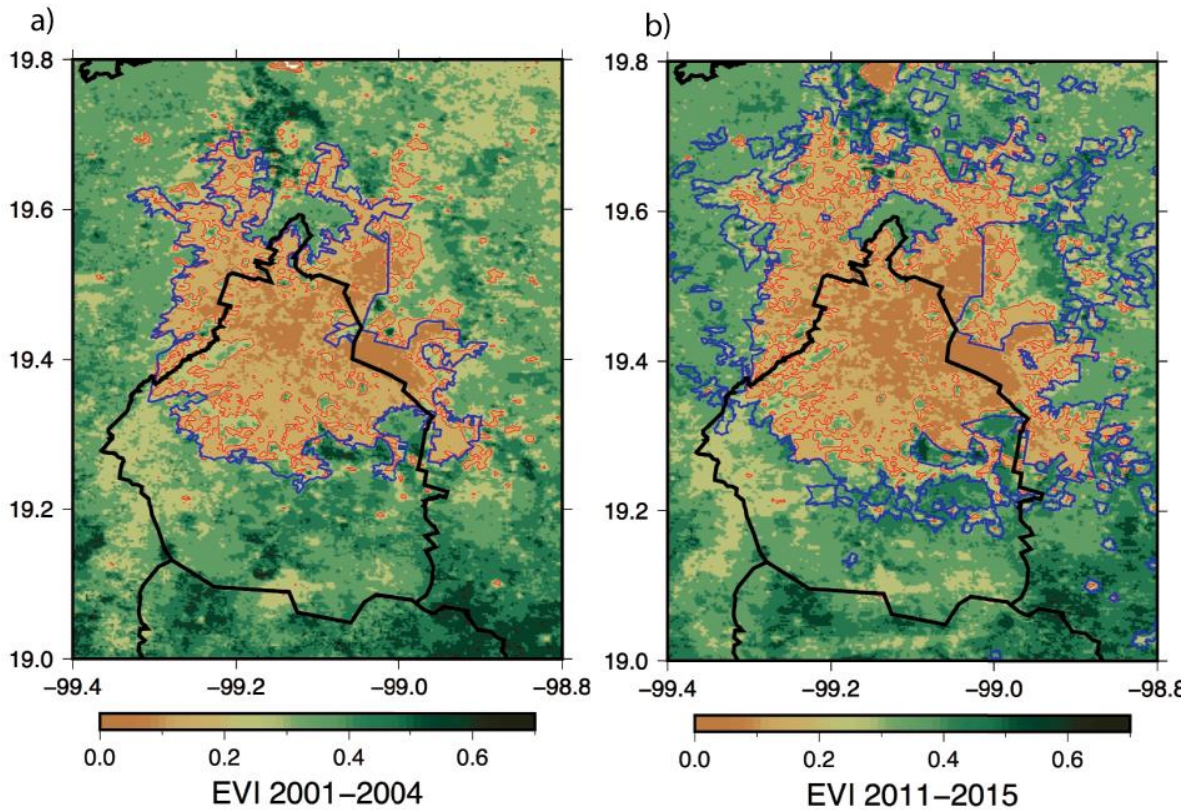


Figura 10. Promedio de EVI

Promedio de EVI para septiembre en la ZMVM para a) 2000-2004 y b) 2011-2015. La línea azul corresponde a la zona urbanizada, la línea roja indica el logaritmo de densidad poblacional (miles de personas por kilómetro cuadrado).

Así, el uso y cobertura del suelo sobre la ZMVM (Buchhorn et al, 2019), muestra que gran parte de áreas verdes han sido cambiadas por áreas urbanas. Este hecho es claro cuando se analiza el contorno de EVI de 0.2, que aproximadamente corresponde a áreas urbanizadas. En la parte oriente de la zona, al sur de la presa Nabor Carrillo, la escasa vegetación coincide con una de las áreas densamente pobladas y con rápido crecimiento.

En la parte del suelo de conservación al sur de la CDMX, el área de bosque ha ido dando paso a asentamientos humanos que disminuyen la extensión de la

vegetación natural, a pesar de las políticas establecidas. En las áreas urbanizadas más recientes, el cambio de uso del suelo ha resultado en incrementos de temperatura de entre 1° y 2°C en 20 años (Jáuregui, 2009). Las áreas más calientes corresponden a zonas asfaltadas, con una densa infraestructura urbana o donde domina el suelo desnudo.

En la parte central de la ZMVM la densidad poblacional ha ido decreciendo paulatinamente, sin embargo, la pérdida de vegetación continúa sobre la mayor parte de la ZMVM, induciendo cambios en la ICU. Los cambios en la temperatura máxima entre dos periodos son mayores en la parte oriental (FIG. 10b), donde la pérdida de vegetación natural y la densidad poblacional han tenido cambios significativos, al igual que hacia el noreste, en la zona más densamente poblada del valle de México.

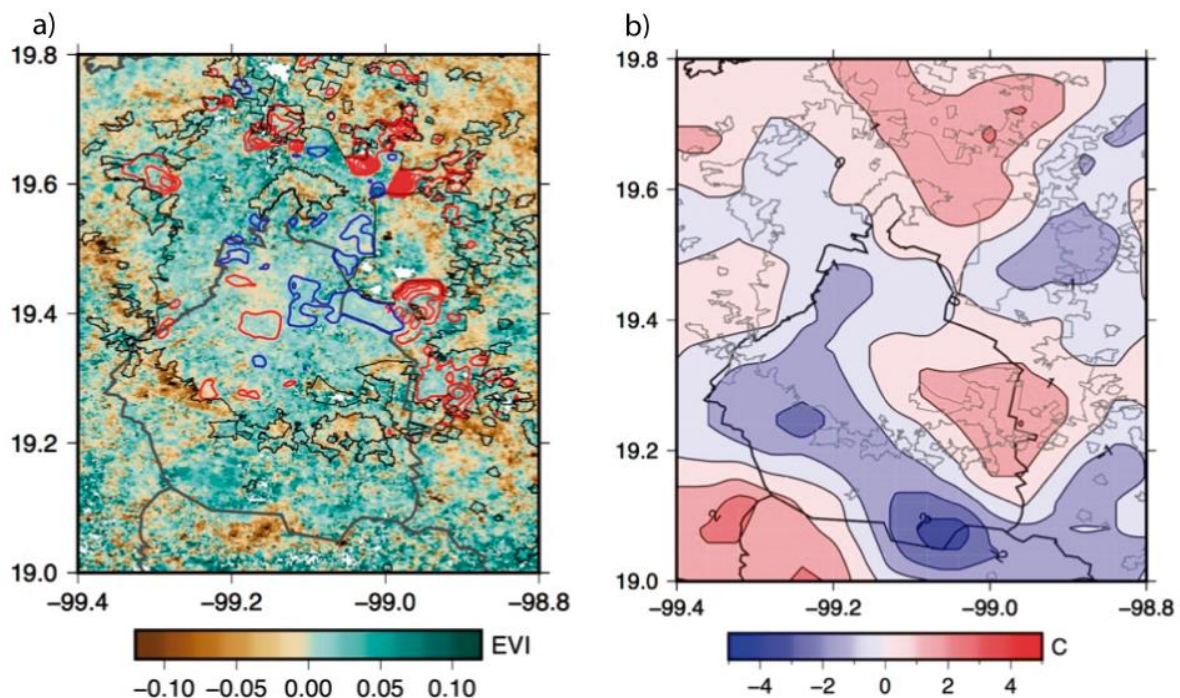


Figura 11. Cambios en EVI y cambios de temperatura máxima

a) Cambio en el promedio de EVI de septiembre entre 2000-2004 y 2011-2015. Los cambios en la densidad poblacional (personas por kilómetro cuadrado) entre 2000 y 2015 se indican con isolíneas, líneas roja o azul indican un incremento o decremento en densidad poblacional, respectivamente. b) Cambio en el promedio de temperatura máxima de marzo-abril-mayo entre 2000-2004 y 2011-2015.

Resulta claro del análisis anterior, que el modelo de crecimiento urbano lleva consigo una disminución significativa de la vegetación, y en general, un deterioro ambiental profundo al perderse los servicios ecosistémicos que estas zonas proveen a la ZMVM.

Un factor adicional que modula las temperaturas máximas en una gran parte de la ZMVM es la advección térmica, es decir, el movimiento de aire fresco desde la parte del suelo de conservación, hacia zonas urbanizadas, principalmente el sur de la CDMX. Este término de advección de calor ha sido menospreciado por algunos autores (e. g. Ballinas y Barradas, 2016) en los cálculos de factores que regulan el clima sobre ZMVM. El efecto de la brisa de montaña en el sur y suroeste del valle, reduce el calentamiento de partes centrales de la región sur de la ICU en horas de la tarde. Entre las 14:00 y 15:00 horas HL, la brisa de valle-montaña sopla hacia el sur de la ZMVM (Fig. 12) advectando aire de menos de 25°C desde la falda de las montañas hacia el área urbana. El efecto refrescante de este proceso puede llegar a ser de 3°C por hora. La pérdida gradual de la vegetación del suelo de conservación resulta en un debilitamiento del gradiente térmico y por consiguiente, en una menor advección de aire fresco hacia la parte urbana, lo que se expresa como un incremento en la magnitud y extensión de la ICU. Así, el crecimiento de la ZMVM

en décadas recientes ha resultado en una ICU más caliente y de mayor tamaño, con una temperatura máxima media en primavera cercana a los 29°C, en la parte centro-oriental del área urbana, esto es, más de 2°C que hace tres décadas.

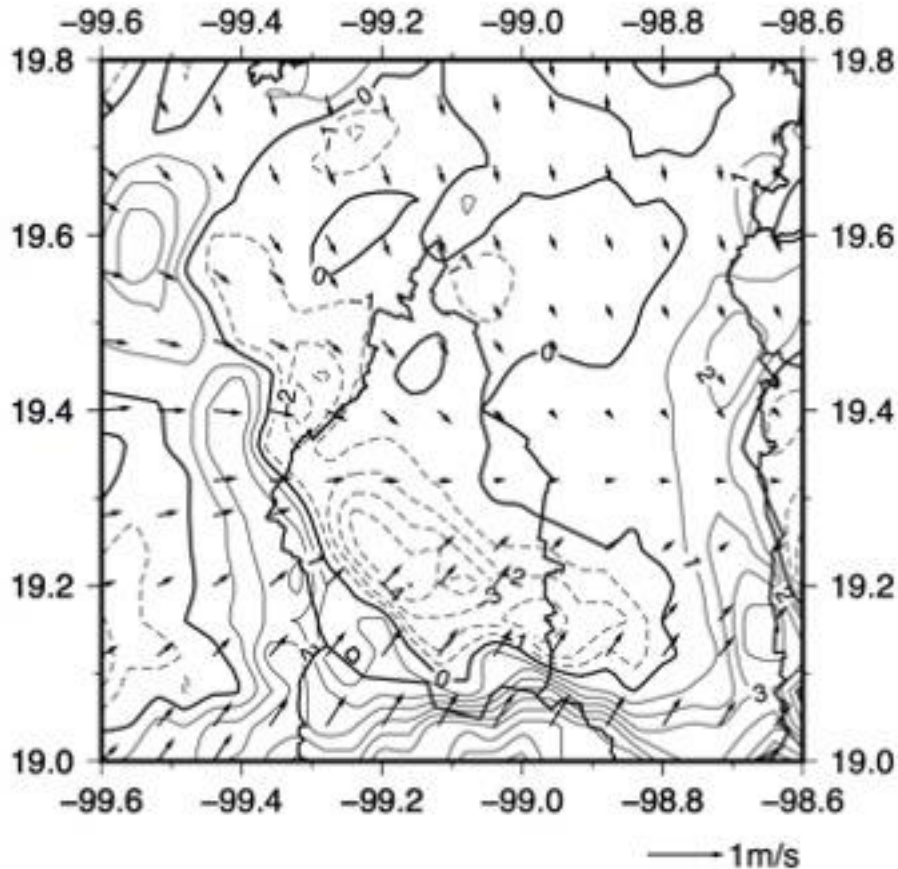


Figura 12. Promedio de viento superficial

Para las 21000 UTC (1500LT) de Abril, los vectores de viento y advección (°Ch-1). Las líneas punteadas indican partes más frescas por la advección de aire templado.

3.5 El peligro climático en la ZMVM: Ondas de calor

Los incrementos en la temperatura máxima llegan a ser un peligro cuando generan riesgos a la salud humana, al cambiar el confort térmico en la urbe. Las ondas de calor pueden ser definidas con respecto a la climatología local de una región, pero en general hacen referencia a valores mayores de 30°C, que han sido determinados

como factor que puede afectar la salud humana. Así, aunque se tienen varias definiciones para las ondas de calor en el mundo, éstas son en general descritas como periodos de calor inusual, que tienen un inicio y cese sutil, con una duración de al menos dos o tres días, y que con frecuencia afectan la salud humana y los sistemas naturales (Mc Gregor, 2015). Las temperaturas máximas en la ZMVM mayormente ocurren durante marzo-abril-mayo, los meses más secos del año, y rara vez están por encima de los 30°C. El percentil 90 de la temperatura máxima muestra el área potencialmente afectada por temperaturas elevadas. Durante el periodo 1965-1980, las temperaturas extremas de primavera usualmente eran de alrededor de 28°C, sobre el área urbanizada del centro de la Ciudad de México (Fig. 13a). Sin embargo, para el periodo 2000-2015, esta área se extendió hacia el noreste y noroeste, como resultado de la urbanización (áreas densamente pobladas con poca o nula vegetación), por lo que el percentil 90 de temperatura máxima diaria está por encima de 29° y de 30°C sobre gran parte de la ICU (Fig. 13b). En el centro-oriente de la Ciudad, en los últimos años ya se han registrado temperaturas máximas de 34-35°C por dos días consecutivos. Lo anterior indica que, la probabilidad de temperaturas superiores a los 29°C es del alrededor del 10%, y que 10 días en primavera pueden presentar estos niveles de calor. Si esto se compara con lo que sucedía hace aproximadamente cuarenta años, se encuentra que el número de episodios de calor intenso se ha duplicado. Adicionalmente, debe considerarse que la población expuesta a estas condiciones climáticas ha crecido significativamente hacia el norte de la ZMVM, lo que constituye un riesgo elevado para sectores vulnerables de la población.

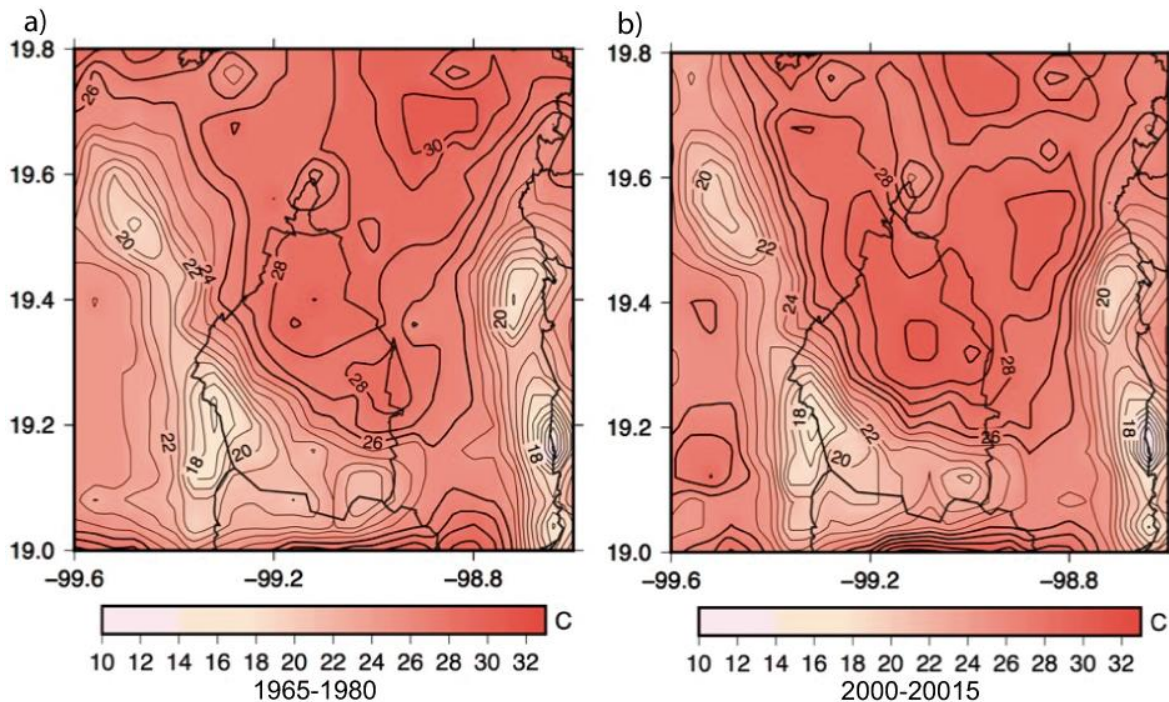


Figura 13. Percentil 90 de temperatura máxima diaria en la ZMVM a) 1965-1980, b) 2000-2015

En áreas que mantienen parte de la vegetación natural, los cambios en el percentil 90 de temperaturas máximas diarias son menores que en las partes donde la vegetación ha sido eliminada, como en las zonas recién urbanizadas. Durante años El Niño, la probabilidad de tener temperaturas arriba de 33°C se incrementan, como fue en verano de 1998, cuando las temperaturas máximas de abril rebasaron los 30°C por varios días consecutivos en gran parte de la ciudad (Magaña, 1999). Esta tendencia muestra un proceso de intensificación de la ICU, pues el número de días con temperaturas máximas superiores a los 30°C ha incrementándose en más del 10% en décadas recientes (Jáuregui, 2009).

Cuando se comparan dos periodos de días con temperaturas por encima de los 30°C resulta claro que este ha crecido en casi un 80% en tan solo tres décadas,

principalmente en la parte centro oriente de la CDMX donde la densidad de población es alta. Como en el caso de la ICU, el patrón espacial de aumento en los días de temperatura máxima superior a los 30°C sigue el patrón de crecimiento de la urbanización y densificación poblacional de la ZMVM (Fig. 14).

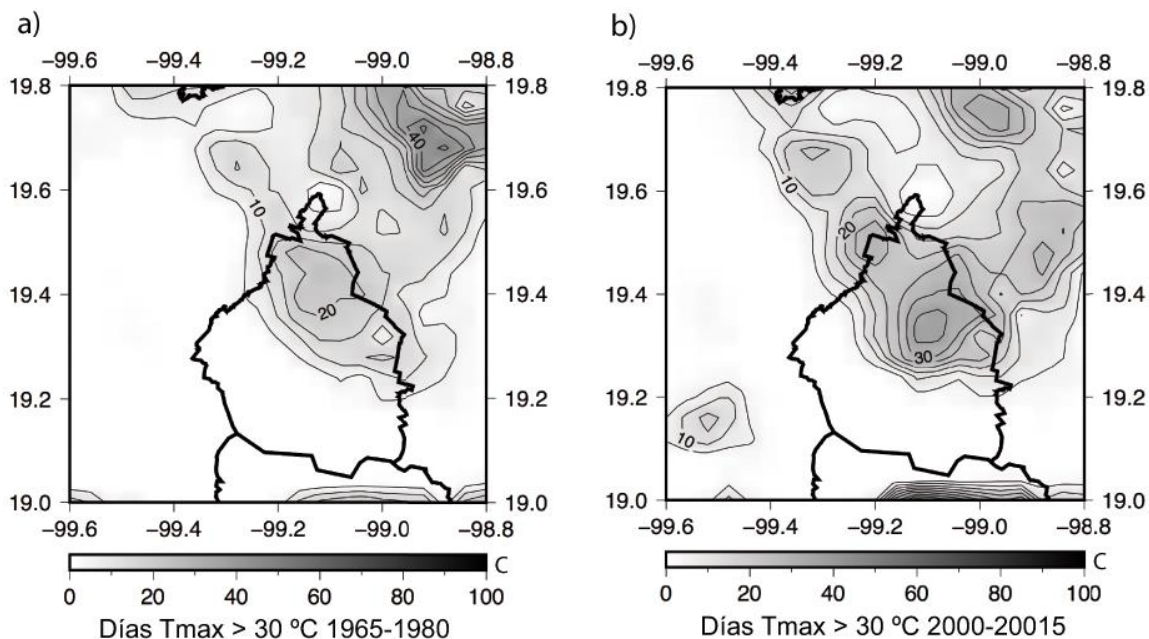


Figura 14. Número medio anual de días con temperatura máxima superior a 30°C para el periodo a) 1960-1985 y b) 1990-2015

3.6 Urbanización y temperaturas mínimas

La ICU también se manifiesta en cambios en las temperaturas mínimas, debido a que las propiedades térmicas de las construcciones y la actividad humana nocturna generan calor que mantiene la burbuja de calor sobre la urbe. Las temperaturas mínimas inferiores ocurren principalmente en los meses de invierno, es decir, entre diciembre y febrero y pueden alcanzar valores cercanos a los 0°C en las partes altas de la ZMVM.

El campo medio de temperatura mínima entre 1960 y 1985 (Fig 15a) muestra que las temperaturas más bajas ocurren en las montañas, pero que en la parte baja del valle de México, la temperatura alcanza los 8°C, y en la zona más urbanizada es de hasta 10°C en promedio. Sin embargo, en décadas recientes (Fig. 15b), la zona de más de 8°C se extienden en un área más amplia que ocupa la mayor parte de la urbanización. Es claro el gradiente de temperatura mínima entre la ICU y los alrededores.

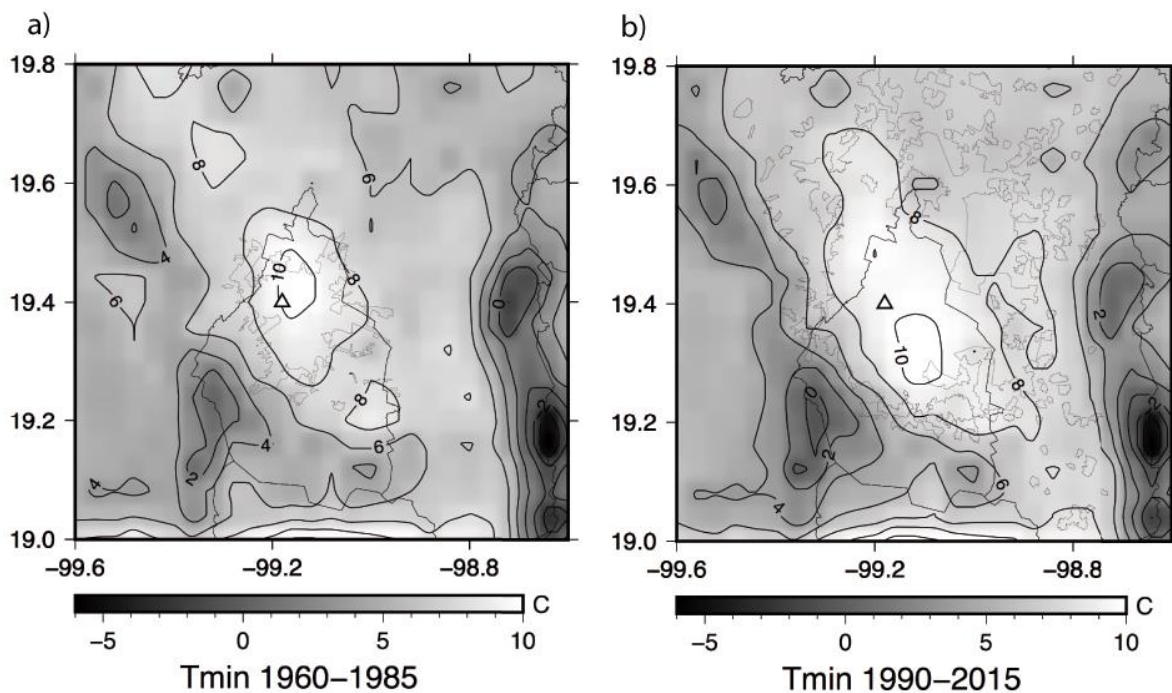


Figura 15. Campos medios anuales de temperatura mínima (°C) para los años a)1960-1985 y b) 1990-2015

Dado el proceso de intensificación de la ICU, las temperaturas mínimas por debajo de los 5°C son ahora menos frecuentes que hace unas décadas. Por ejemplo, en los años 1960-1980, era solo en la parte central de la ZMVM que solía haber menos de 50 días por año en promedio con temperaturas mínimas por debajo de 5°C, dado

que ahí se desarrollaba la mayor parte de la actividad humana. Sin embargo, en las últimas décadas, el área con menos de cincuenta días con temperaturas mínimas por debajo de 5°C se ha expandido junto con la urbanización y las actividades humanas (Fig. 16a y 16b). Las condiciones relativamente frías permanecen casi sin cambios en las montañas circundantes, lo que genera un mayor gradiente térmico en relación con la ICU durante las noches madrugadas. En general, las noches frías que representan un peligro para la salud humana van disminuyendo por el calor generado en la ciudad.

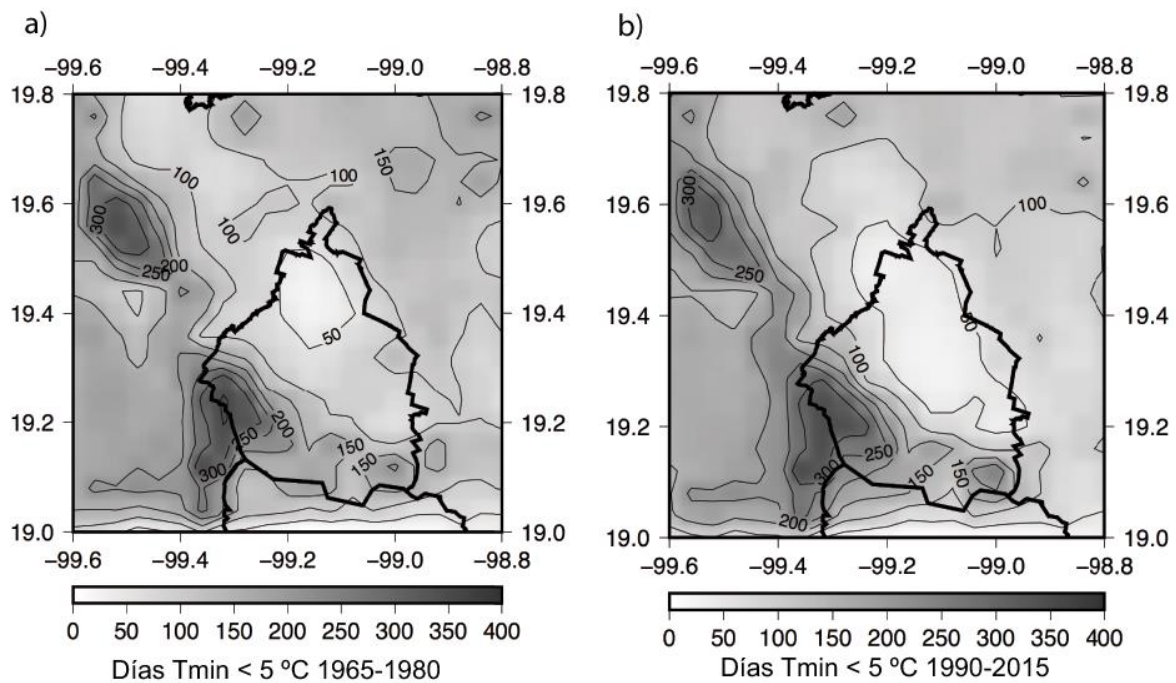


Figura 16. Número medio de días con temperatura mínima inferior a 5°C para el periodo a)1960-1985 y b) 1990-2015

3.7 Cambios en el ciclo hidrológico

Como en el caso de las temperaturas, la ICU genera cambios en el ciclo hidrológico, principalmente en las precipitaciones intensas. Los cambios de humedad y temperatura cerca de la superficie, en la capa límite, resultan en mayor cantidad de agua precipitable y menor estabilidad atmosférica, lo que permite el desarrollo de tormentas intensas. Jáuregui y Romales (2000) han documentado cómo las lluvias intensas en la ZMVM se han incrementado durante el siglo XX. Tal incremento está principalmente relacionado al aumento en el número de eventos extremos de lluvia.

Un análisis de las lluvias en Tacubaya, al poniente de la ZMVM muestra que las transiciones a periodos de más precipitación ocurren en relación con los incrementos de temperatura máxima, más que con cambios en las temperaturas mínimas, identificándose tres regímenes de lluvia anual: 1877-1917, 1920-1960 y 1961-2015 (Fig. 17). Incluso, se observa que en años recientes (2007-2012) ocurre un ligero descenso en la lluvia anual en Tacubaya. Entre los años 1960 y 1990 ocurren algunos de los periodos más lluviosos en la ZMVM.

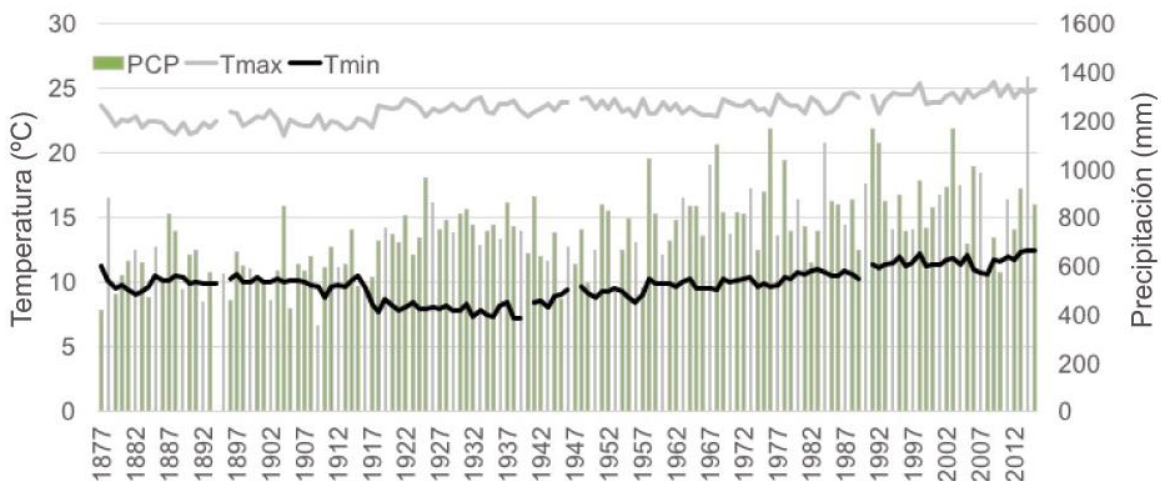


Figura 17. Serie de temperaturas y precipitación en Tacubaya, CDMX.

Serie temporal de temperaturas medias anuales máximas (línea gris) y mínima (línea negra) (° C) y precipitación acumulada anual (mm / año) en la estación Tacubaya, en el occidente de la Ciudad de México, de 1877 a 2015.

Los análisis de precipitación en malla corresponden a lluvias a partir de 1960 por lo que no es posible determinar las transiciones de un periodo a otro como las que se muestran en la serie para Tacubaya. Los análisis para el periodo reciente indican incluso una ligera disminución en el campo total de lluvias, influenciado por el periodo 2007-2012 en que, como se muestra en la serie para Tacubaya, hay una disminución en la lluvia total anual (Fig. 18).

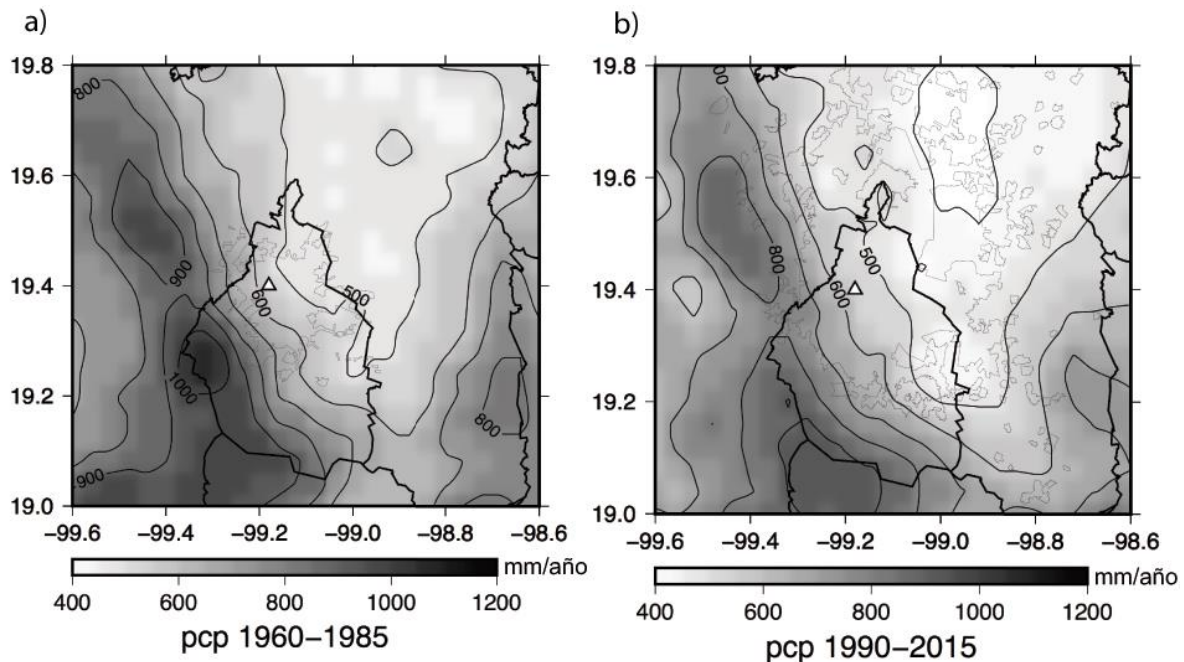


Figura 18. Campos promedio de precipitación acumulada anual (mm/año) en a) 1960-1985 y b) 1990-2015

El número de días con precipitaciones superiores a 20 mm / día tiende a ser mayor en las partes occidental y sur de la ZMVM, como en la estación meteorológica El Guarda - 9022 (19.134 N, 99.173 W), donde la precipitación anual supera los 1000 mm/año con más de 50 eventos por año con lluvia superior a 20 mm/día, donde el

efecto orográfico tiende a intensificar las tormentas. El umbral de 20 mm/día se utiliza como referencia para un evento de lluvia extrema, considerando que está cerca del percentil 95% de precipitación diaria y que eventos de precipitación más intensos que este valor aumentan el riesgo de inundaciones (Fig. 19). Como en el análisis de la precipitación anterior, hay un periodo reciente de disminución en el número de eventos de precipitación extrema entre 2007 y 2012 en la mayor parte del dominio de interés, que resulta en disminuciones en la precipitación total anual.

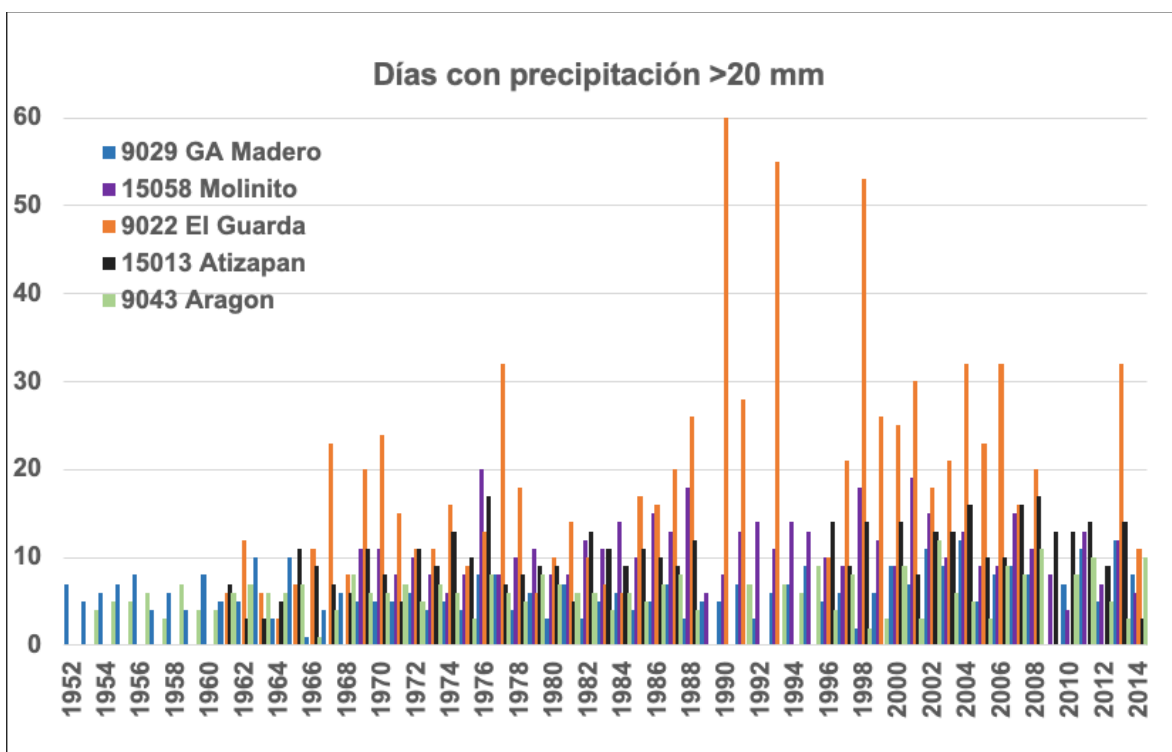


Figura 19. Días con precipitación mayor a 20 mm.

Número medio anual de días con precipitación diaria superior a 20 mm/día para varias estaciones de la ZMVM, entre 1950 y 2015. GA Madero (norte), Molinito (oeste), El Guarda (sur), Atizapán (noroeste) y Aragón (noreste).

La disminución en el número de eventos de precipitación extrema no modifica sin embargo, la tendencia positiva en la precipitación anual que se observa desde la

década de 1950, con tormentas más intensas. El número de tormentas intensas en la mayor parte de la ciudad parece haberse duplicado en unas seis décadas y se trata de un aumento de un peligro meteorológico que aumenta el riesgo de inundaciones.

La tendencia a un mayor número de eventos extremos viene observándose en la ZMVM y en gran parte de las ciudades del mundo. Siguiendo principios físicos, como la ecuación de Clausius Clapeyron, se tiene que una parcela de aire caliente, como la burbuja de calor sobre las ICUs, tiende a contener más humedad que una masa de aire frío. Es por ello que el agua precipitable tiende a aumentar en décadas recientes.

Un diagnóstico de humedad específica en la zona oriente y poniente de la ZMVM muestra que los valores extremos de contenido de vapor de agua están incrementándose con los años, pues los valores de más de 14 g/kg son cada vez más frecuentes (fig. 20).

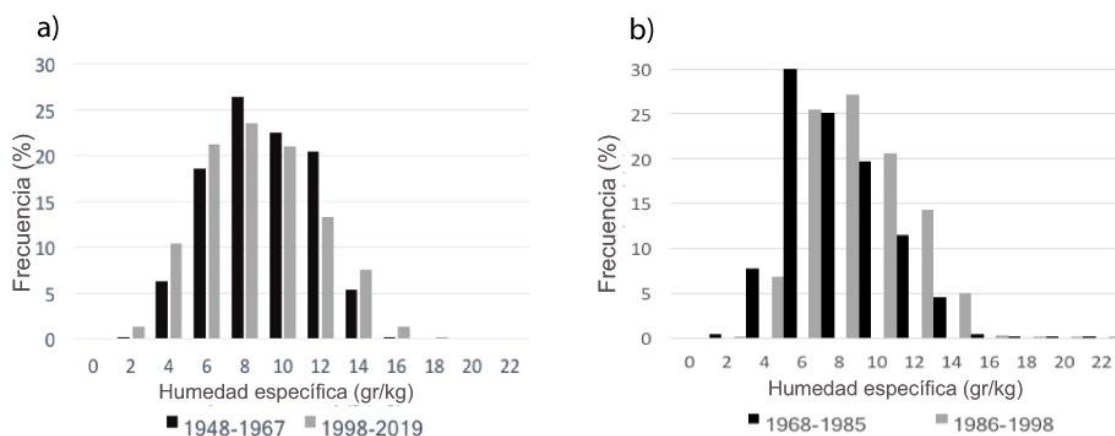


Figura 20. Humedad específica

Histogramas de humedad superficial específica (gr / kg) para dos períodos contrastantes en a) Tacubaya (1948-1967) y (1998-2019), y b) en el Aeropuerto de la Ciudad de México (1968-1985) y (1986-1998) períodos.

Los diagnósticos anteriores muestran que el peligro climático por calor y por lluvia se ha incrementado conforme se ha dado la expansión urbana de la ZMVM. Así, el modelo de desarrollo conlleva cambios climáticos y mayor peligro que incrementa las probabilidades de riesgo a la salud y a la seguridad de las personas. Pero es importante determinar también, cómo el riesgo se eleva debido a que la vulnerabilidad de la población en la zona metropolitana se ha venido incrementando, no solo por una mayor exposición, sino también por una significativa construcción social de vulnerabilidad.

3.8 Riesgo por ondas de calor en la ZMVM

En algunas regiones de México, los impactos por ondas de calor han sido asociados a golpe de calor u otras afectaciones en personas con enfermedades cardiovasculares. Por ejemplo, en Mexicali, las temperaturas máximas alcanzan los 40°C con frecuencia de más del 20% de probabilidad (Jaramillo, et al, 2011), lo cual resulta en altas tasas de mortalidad (Díaz et al., 2014), principalmente entre personas que realizan actividades de trabajo al aire libre durante los periodos de calor intenso.

En la ZMVM las temperaturas máximas rara vez alcanzan valores que puedan amenazar la vida humana. No obstante, en años recientes el calor parece ser un mecanismo que aumenta los casos de enfermedades diarreicas agudas (EDAs). Las EDAs, a pesar de mostrar una tendencia a la baja en México, siguen apareciendo en periodos en que el calor o las lluvias intensas ocurren. En el primer

caso se puede pensar en descomposición de alimentos y falta de acceso a agua potable para limpieza de comida e higiene personal. En el segundo caso, pueden ocurrir afectaciones cuando las fuentes de agua potable se contaminan por el arrastre de bacterias hacia los ríos o cuerpos de agua que alimentan a una población.

Las afectaciones por EDAs en ciertos grupos de población de la ZMVM son más frecuentes en el noroeste de la urbe principalmente durante los meses más cálidos del año, esto es, durante marzo-abril-mayo. Son diversos los factores que pueden determinar esta distribución espacial de los casos de EDAs, pero el consumo de comida descompuesta por la presencia de temperaturas cálidas o y ventarrones con polvo y dispersión de bacterias, puede estar entre las causas principales, al igual que el limitado acceso a agua potable, la edad y salud de las personas, así como el acceso a servicios de salud.

En la ZMVM más del 90% de la población tiene acceso a agua potable en el interior de sus casas. Sin embargo, parte de la población que habita el oriente de la ciudad, carece de servicios públicos, como agua potable (INEGI, 2018). El limitado acceso a este servicio público, particularmente durante la primavera, contribuye a faltas en las medidas de higiene y la proliferación de EDAs principalmente entre los niños. Durante los periodos en que ocurren las ondas de calor, cuando las interrupciones en la distribución de agua son frecuentes, las enfermedades de este tipo tienden a aumentar.

Para determinar la relación entre la onda de calor y los casos de EDAs, se analizaron temperaturas máximas semanales promediadas espacialmente sobre la ZMVM y los episodios de calor generalizado se compararon con reportes de diarrea en niños entre 0-14 años para el periodo 2000-2011 (Fig. 21). Se utilizó el promedio espacial de temperaturas máximas semanales, considerando que las ondas de calor afectan el dominio completo, y no son resultado de un fenómeno puntual en la ciudad.

En la mayoría de los años del periodo 2000-2011, las temperaturas máximas semanales por encima de la media anteceden un aumento en los casos de EDAs por una o dos semanas, principalmente durante los meses de primavera. La diferencia temporal está relacionada al tiempo de incubación de la enfermedad, el tiempo que toma acudir al hospital y el que transcurre para ser dado de alta y quedar registrado en los reportes semanales de COFEPRIS. La Secretaría de Salud del gobierno federal considera un número de casos esperado para cada semana, pero la situación llega a ser atípica cuando el número de reporte de EDAs rebasa tal nivel. En general, la intensidad de la onda de calor, no es proporcional en el incremento de registros de EDAs, sin embargo, las temperaturas máximas semanales arriba de lo normal, son seguidas de un aumento en el número de registros de casos de EDAs en niños de entre 0-14 años. Por ello, el riesgo depende de la ocurrencia de una onda de calor, y sus impactos en términos de EDAs es sólo dado por probabilidades. El diagnóstico de la relación, peligro – impacto indica que los aspectos temporales de los brotes de EDAs están dados por la ocurrencia de

una onda de calor, sin embargo, no todas las zonas de la población son igualmente vulnerables a esta condición meteorológica.

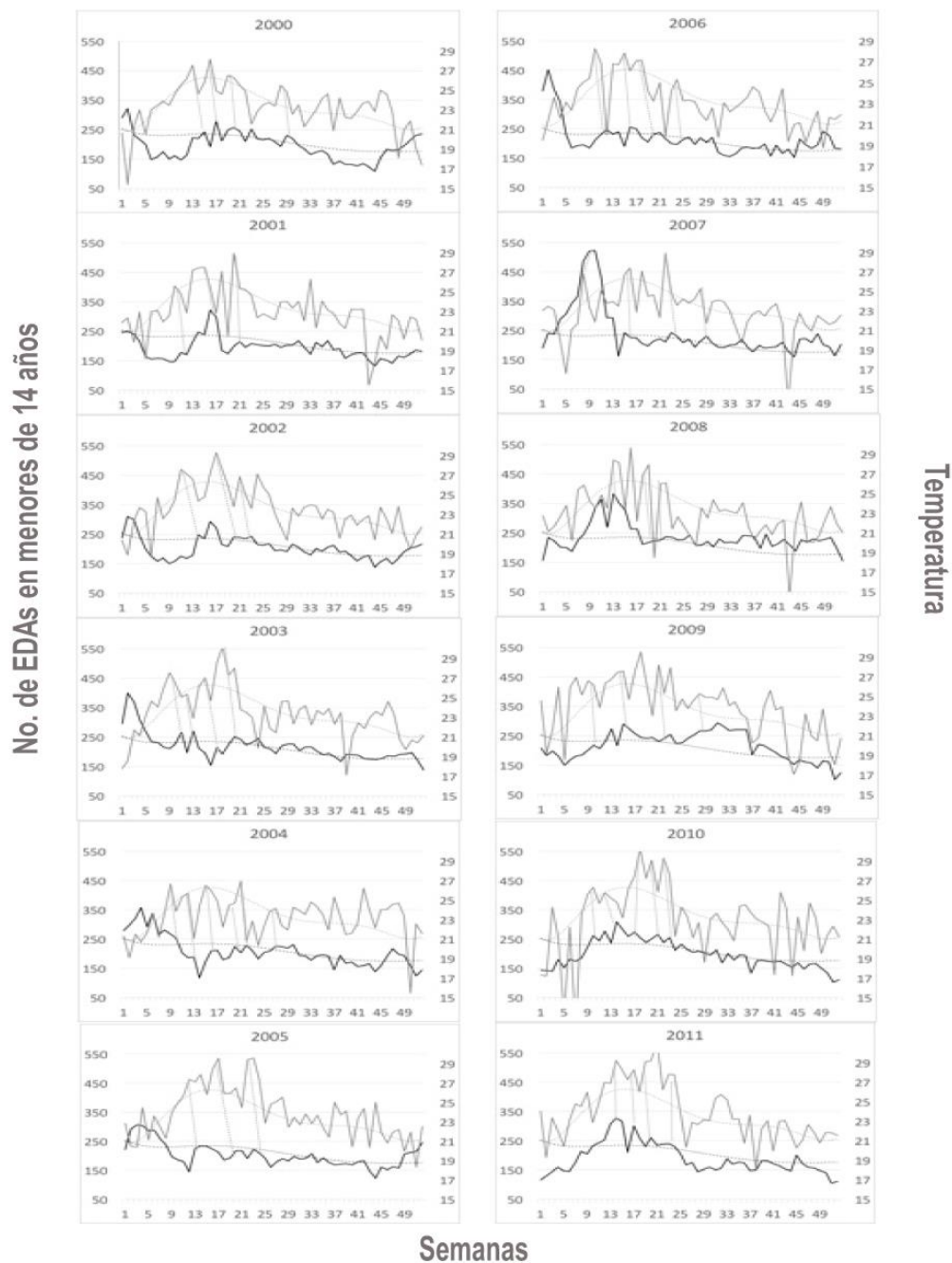


Figura 21. Egresos hospitalarios por EDAs

Registros de egresos hospitalarios semanales entre niños de 0-14 años que sufrieron de Enfermedades Diarreicas Agudas, EDAs, en la ZMVM (línea negra). Promedio semanal de temperatura máxima en la ZMVM (línea gris). Las líneas suavizadas corresponden a la climatología semana de cada variable. Las líneas punteadas verticales muestran la respuesta entre el cambio en temperatura máxima y el incremento en el registro de casos de EDAs.

La magnitud del impacto EDA no solo depende de las temperaturas máximas anómalas sino de la condición de vulnerabilidad. Las condiciones sociales, económicas y ambientales son el contexto que determina las afectaciones que los episodios de calor pueden generar.

3.9 Vulnerabilidad y riesgo ante ondas de calor

Un gran número de personas expuestas a episodios de calor incrementa el riesgo de sufrir afectaciones a su salud. Por ello, se trabaja con tasas de afectación por EDAs. Desde hace ya algunos años, un gran porcentaje de la población en México presenta obesidad y problemas cardiovasculares (DiBonaventura et al., 2018), condición que es especialmente severa entre los niños. Estos factores pueden hacer que la población sea vulnerable a episodios de temperaturas extremas por arriba del promedio, es decir, arriba de 30°C, que ocurren durante ondas de calor en zonas altamente urbanizadas. Es así como la vulnerabilidad de la población de la ZMVM ante episodios de calor extremo depende de diversos factores como son:

- i) acceso a servicios públicos (agua potable),
- ii) acceso a servicios de salud,
- iii) densidad poblacional (hacinamiento),
- iv) analfabetismo (usar información sobre riesgos climáticos),
- v) nivel de vegetación (modulación de temperaturas),

- vi) disponibilidad de refrigerador (conservación de alimentos).

Todos estos indicadores son dinámicos (varían en el tiempo) y pueden describirse en términos de datos oficiales, usando datos censales. Por ejemplo, el mayor incremento en densidad poblacional, sucedió en los nuevos asentamientos ubicados en el noreste de la ZMVM, donde el servicio de agua potable es muy deficiente. En el presente análisis de vulnerabilidad, se diagnostica que la población es más vulnerable a los episodios de calor y está en riesgo de sufrir EDAs cuando el acceso a agua potable es insuficiente.

Los indicadores de vulnerabilidad normalizados son construidos usando información oficial de censos de años recientes: 2000 y 2010 (INEGI, 2018), obtenidos a nivel municipal. Los registros de impactos (boletines de COFEPRIS) son a escala municipal por lo que ésta será la unidad de análisis de riesgo. El riesgo se estima por tanto, combinando un elemento probabilístico con uno determinístico como lo es un índice de vulnerabilidad al calor. Los datos de peligro corresponden al percentil 90 de temperatura máxima combinados con el índice de vulnerabilidad construido con los factores listados anteriormente, para obtener el índice de riesgo de padecimientos de EDAs para 2000 y 2010. Durante el año 2000, la población más vulnerable se localizó en la parte oriente de la ZMVM, hacia el Estado de México, (Fig. 22a). En 2010, la población con mayor vulnerabilidad fue localizada en los nuevos asentamientos, la parte noreste, hacia la periferia de la zona ZMVM (Fig. 22b) sugiriendo que los nuevos asentamientos tardan en recibir los servicios públicos como el de agua potable, lo que los hace más vulnerables. Algunos de los

lugares más vulnerables, corresponden con asentamientos irregulares, con pocos o nulos accesos a servicios básicos y a la salud. El ambiente de estos lugares es usualmente degradado, con poca vegetación natural y altos niveles de contaminación (Makhelouf, 2009). La baja vulnerabilidad en el centro de la ZMVM, indica que la población ha alcanzado un nivel socioeconómico más alto, así como adecuados servicios públicos a través de los años.

El registro de egresos hospitalarios no coincide de forma precisa con la distribución de la población más vulnerable, ya que es común que los afectados, por ejemplo, por EDAs, se desplacen a centros hospitalarios de la CDMX. Así, de los municipios del oriente del Valle de México, en el EDOMEX, provendrán muchos de los casos que se registren en las alcaldías del oriente de la Ciudad de México. Esta es una de las limitaciones que impone la base de datos usada para medir el riesgo y el impacto por ondas de calor.

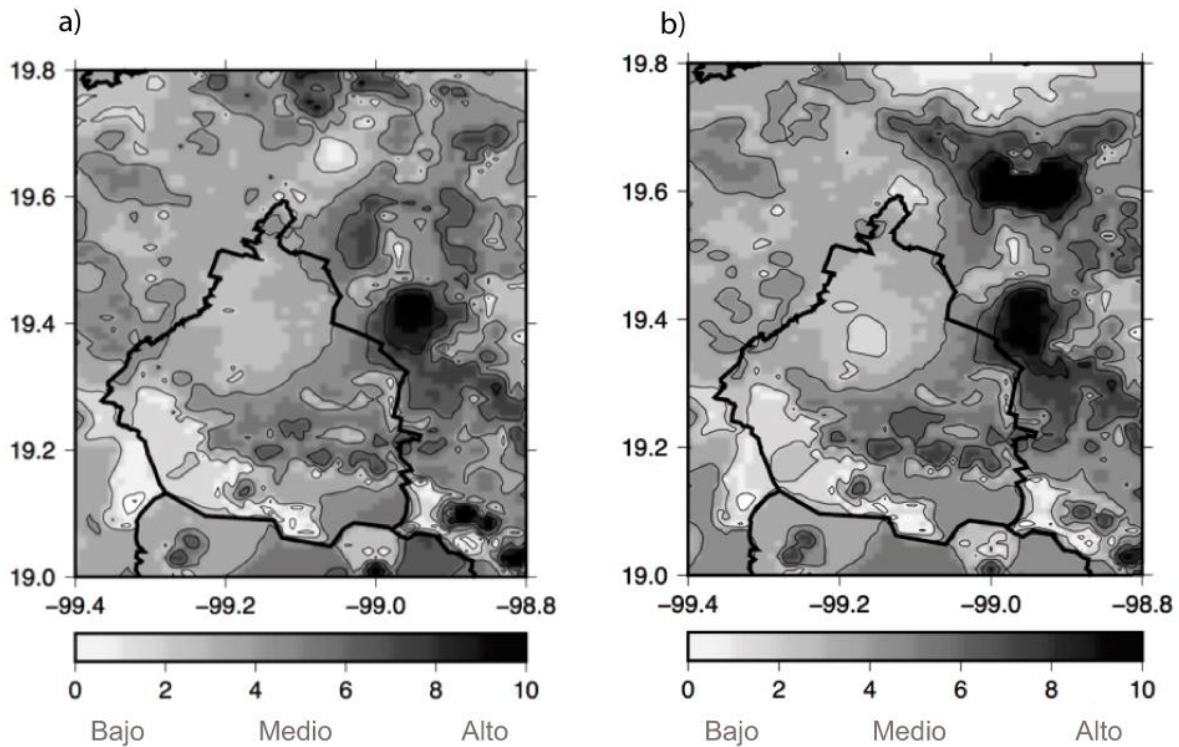


Figura 22. Índices de vulnerabilidad

Índice de vulnerabilidad a temperaturas máximas extremas por ondas de calor a) 2000 y b) 2010 en la ZMVM. La escala hace referencia a valores de vulnerabilidad de baja a alta.

El peligro, es por lo general mayor hacia el oriente de la ZMVM. El percentil 90 de temperatura máxima en esta región incrementa el riesgo climático de EDAs por episodios de calor, entre niños de 0-14 años, sobre todo en años recientes (Fig. 23). Cuando se calcula el riesgo ante onda de calor que puede derivar en EDAs, se tiene que las áreas de mayor riesgo corresponden aproximadamente a las zonas con mayor número de registros de presencia de EDAs entre infantes, esto es, en el norte y oriente del área urbana (Fig. 24). El gran número de registros de EDAs (a nivel municipal) se presentan también en el noreste y noroeste de la ZMVM, aproximadamente en correspondencia con las zonas de alto índice de riesgo climático. Se encontraron diferencias en las ubicaciones exactas de máximo número

de registros de EDAs con el riesgo estimado, ocasionado porque algunos de los enfermos del Estado de México, acuden a servicios de salud a la Ciudad de México. Sin embargo, en términos de riesgo, los impactos en la distribución espacial y temporal, se explican mejor a través de los impactos por riesgo que solo por el peligro. La limitación para obtener información sobre casos de EDAs (lugar donde la gente adquirió la enfermedad) causada por calor extremo, reduce la habilidad del modelo de riesgo para definir mejor la ubicación de los impactos. Esto es obviamente, parte de la incertidumbre de cualquier modelo de riesgo.

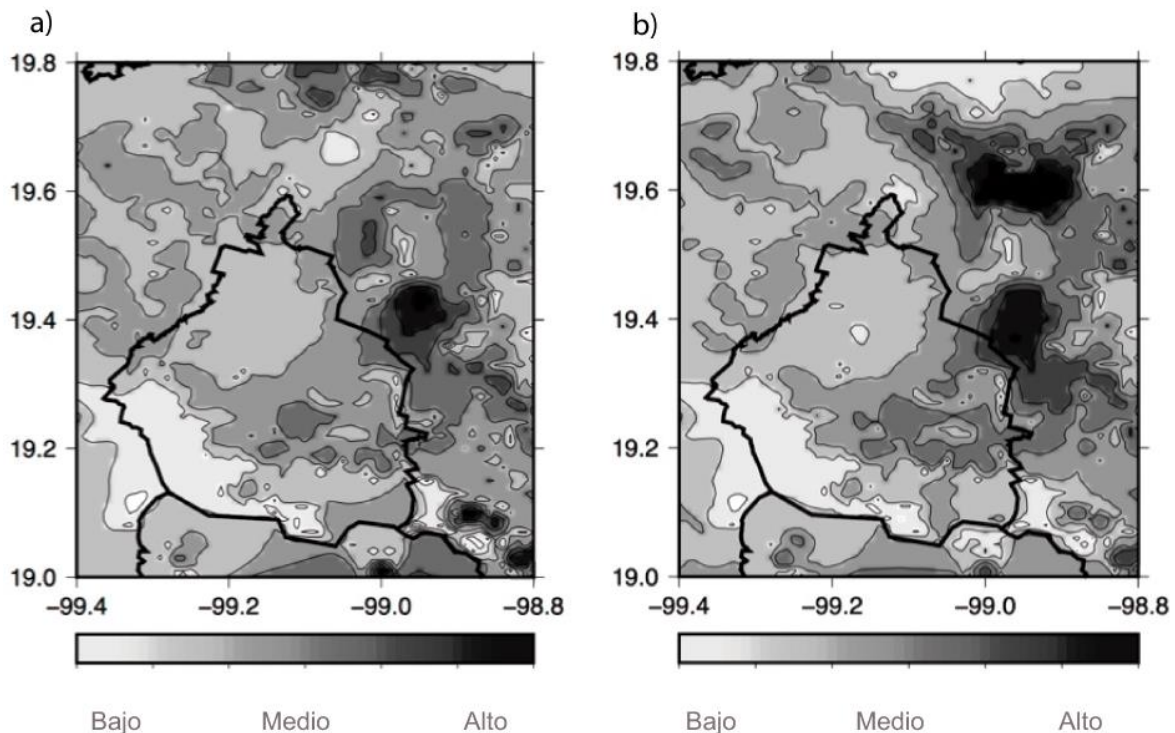


Figura 23. Riesgo de contraer EDAs bajo episodios de calor en la ZMVM para a) 2000-2004 y b) 2010-2014

La importancia de una aproximación de riesgo, desde la cuantificación de los factores de vulnerabilidad, permite proponer medidas de adaptación adecuadas para episodios de calor en la ZMVM, que lleven a implementar una estrategia de prevención en el sector salud. Por ejemplo, puede implementarse un Sistema de Alerta Temprana cuando se registre o pronostique una onda de calor, el cual ponga especial atención entre los sectores de la población más vulnerables.

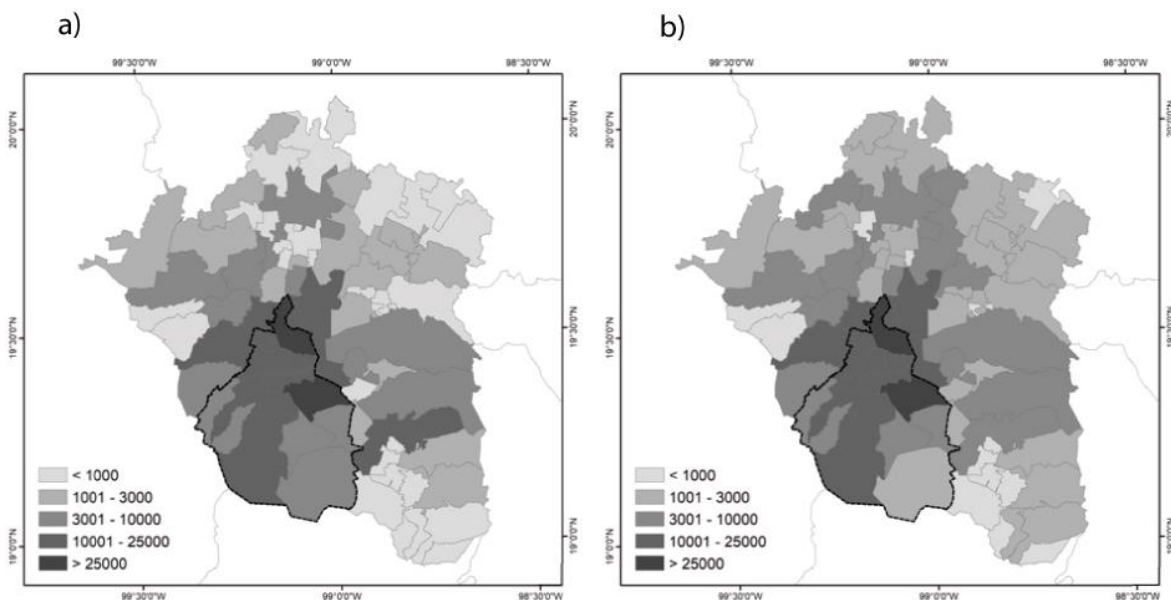


Figura 24. Tasas de egresos hospitalarios

Número de registros de tasas de egresos hospitalarios por EDAs en niños de 0-14 años, a nivel municipal en la ZMVM para marzo-junio de a) 2000-2004 y b) 2007-2011. Fuente: COFEPRIS

En el Valle de México, a medida que se incrementa la temperatura, se puede aproximar a un punto de estabilización del clima dado que el forzante climático por cambio de uso del suelo deja de incrementarse pues ya no hay superficie por urbanizar. Una vez que las temperaturas llegan a ser muy altas, puede ocurrir, en caso de que exista humedad, una convección que fomentará la formación de más nubes y por consiguiente, las temperaturas máximas pueden incluso disminuir al

recibirse menos radiación solar en superficie, dejando de ser extremas. Por ejemplo, en el caso de la estación 9043 en la alcaldía G. A. Madero, se observa que al aumentar las precipitaciones, las temperaturas máximas tienden a disminuir (Fig. 25). Este proceso es conocido como efecto termostato, en el cual, a mayor temperatura de superficie y mayor humedad, incremento de formación de nubes, que pueden disminuir la radiación entrante y, por tanto, el nivel de calentamiento o temperatura máxima. Con ello, el sistema puede autorregularse y da una muestra de lo complejo que puede ser proyectar el clima si sólo se considera un factor forzante del clima.

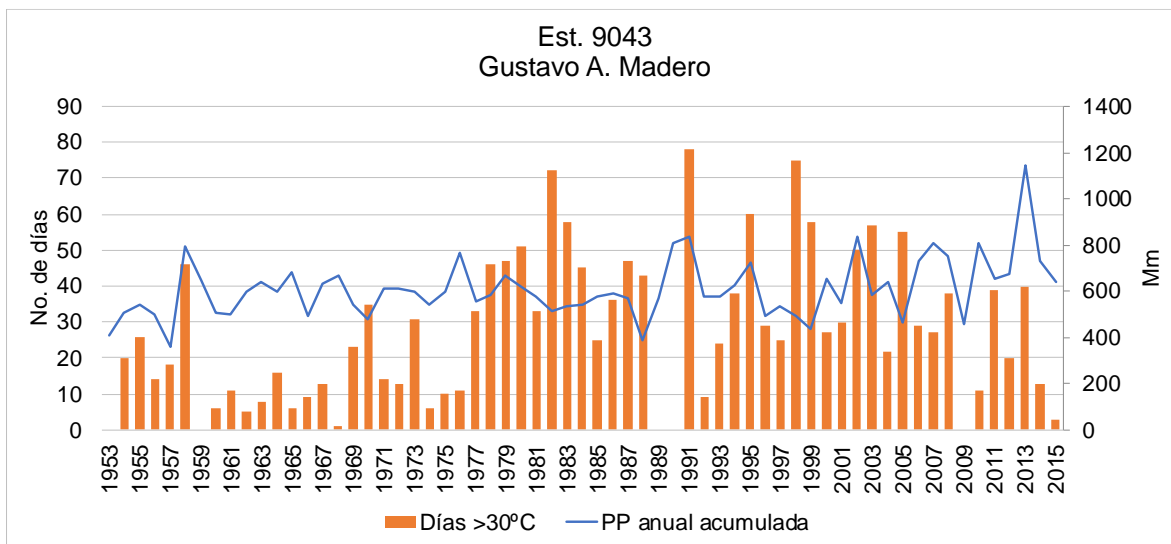


Figura 25. Número de días con temperatura mayor a 30°C por año y precipitación anual acumulada del periodo 1953-2015

Fuente: Elaboración propia con datos del Servicio Meteorológico Nacional.

La relación temperatura – lluvias puede ser difícil de proyectar por los efectos no – lineales que pueden presentarse. Sin embargo, es de gran importancia desde una

perspectiva de riesgo, dado que los impactos que éstas tienen en términos de inundaciones son muy costosos, social, económica y ambientalmente.

3.10 Riesgo de inundaciones

La tendencia a eventos de precipitación más intensos puede estar relacionada con una mayor humedad atmosférica (y agua precipitable) en una atmósfera más cálida. Además, la ICU tiende a producir cambios en la estabilidad atmosférica en la capa límite que permiten el desarrollo de sistemas convectivos intensos. La estabilidad atmosférica en la capa límite sobre la ZMVM ha disminuido a medida que aumenta la temperatura de la superficie en relación con la ICU. La estabilidad atmosférica más baja puede analizarse utilizando los datos de sondeo del aeropuerto de la Ciudad de México durante dos períodos pares de alrededor de quince años cada uno 1968-1985 y 1986-1998 (Fig. 26). El resultado muestra que la mayor parte del tiempo la atmósfera inferior es condicionalmente inestable, pero con frecuencia (30% del tiempo, en las últimas décadas), tiene una tasa de gradiente superadiabático. Un gradiente superadiabático ocurre cuando el lapso es menor de $-10\text{ }^{\circ}\text{C / km}$ (Hodge, 1956) y está asociado con un intenso calentamiento solar en la superficie, en regiones donde los vientos son débiles y los suelos están secos, como en la parte noreste de la Ciudad de México. Este tipo de estabilidad se suele observar en las capas poco profundas de la atmósfera. Un gradiente térmico superadiabático cerca de la superficie puede provocar precipitaciones intensas dependiendo del contenido de humedad atmosférica, entre otros factores.

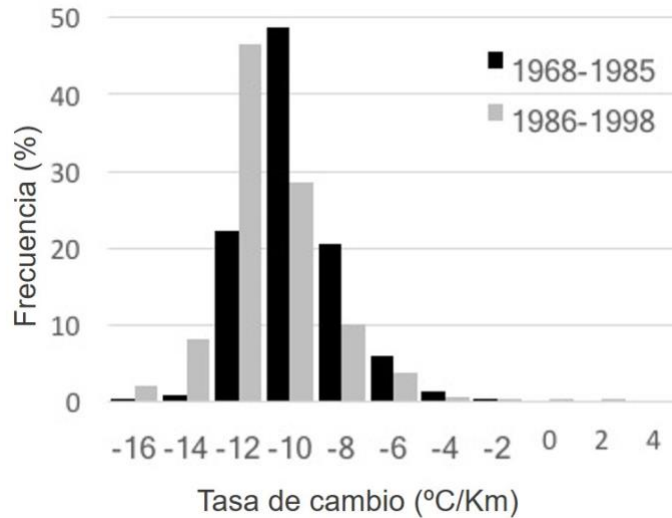


Figura 26. Estabilidad atmosférica

Estimación de la estabilidad atmosférica en la capa límite de la ZMVM basada en la temperatura del aire y la altura geopotencial, entre la superficie y 700 hPa para los períodos 1968-1985 (columna negra) y 1986-1998 (columna gris).

El análisis anterior muestra que la estabilidad atmosférica más baja y la humedad atmosférica mayor pueden resultar en una actividad convectiva y precipitación más intensa, es decir, un mayor peligro. Dependiendo de la condición de vulnerabilidad, el riesgo de inundaciones urbanas puede ser mayor.

Una gran cantidad de estudios se centran en la influencia humana en el calentamiento global, descuidando la importancia de los factores que generan vulnerabilidad y, en consecuencia, un mayor número de desastres en las últimas décadas. La vulnerabilidad y el riesgo no tienen una definición universalmente aceptada, y no existe una única conceptualización “correcta” o “mejor” que se adapte a todos los contextos de su evaluación. Los factores de vulnerabilidad a las lluvias intensas incluyen, entre otros: cambios de uso de suelo y de permeabilidad

del terreno, crecimiento de la población, pobreza, infraestructura urbana insuficiente y pérdida de servicios ecosistémicos.

El término vulnerabilidad climática se ha definido de diversas formas, pero generalmente se refiere al grado en que un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, incluida la variabilidad y los extremos climáticos. Uno de los elementos que aumenta la vulnerabilidad es la exposición y dado el rápido crecimiento demográfico de la población de ZMVM, la vulnerabilidad ha aumentado significativamente, junto con la frecuencia y magnitud de los peligros naturales. Los peligros climáticos y la vulnerabilidad conducen a niveles más altos de riesgo climático y, en consecuencia, a un mayor número de desastres.

Existen diversas formas en las que aumenta el riesgo climático en la ZMVM, pero tres de las más importantes son: i) el aumento de la urbanización, iii) la falta de infraestructura, y ii) la pérdida de vegetación natural. En el caso de la ZMVM estos factores están estrechamente relacionados, ya que la necesidad de vivienda e infraestructura urbana conduce a la deforestación y a ocupar regiones con vegetación natural.

La pérdida de vegetación se produce a medida que el área urbana se expande como en la parte occidental de la Ciudad de México. El área urbana tiene valores reducidos de vegetación y, en consecuencia, servicios ecosistémicos como la regulación del clima. El proceso de deforestación tiene lugar principalmente en la

periferia del área urbana. Es sobre las montañas del oeste y sur que rodean la ZMVM donde ocurren los eventos de precipitación más intensos. La pérdida de vegetación en la parte occidental del Valle de México incrementa las escorrentías hacia las partes bajas sobre la zona urbanizada. El número de eventos de precipitación intensa ($pcp > 20$ mm/día) ha disminuido en alrededor de cuatro eventos por año durante los últimos cincuenta años, en la parte occidental del dominio. En la parte sur de la ZMVM, el número de eventos intensos ha aumentado en alrededor de 4 a 5 eventos por año en promedio. Esto significa que, en la parte occidental, la dinámica del peligro es menor en el poniente y mayor en el sur. Las causas de tales cambios en el peligro pueden estar en los cambios en el uso de suelo o en la no-linealidad misma del sistema climático local.

Aunque en la parte sur de la ZMVM el peligro por tormentas es mayor, la vulnerabilidad es relativamente menor, debido a la conservación del área boscosa y sus propiedades de infiltración. En el poniente, sin embargo, las tormentas siguen siendo intensas, pero la alta deforestación aumenta los escurrimientos. Es así que el número de eventos de inundación van en aumento (Fig. 27) y no necesariamente por un incremento en la actividad de tormentas. Lo anterior implica un rápido crecimiento en la vulnerabilidad que genera escurrimientos e inundaciones.

Número de inundaciones reportadas en la ZMVM

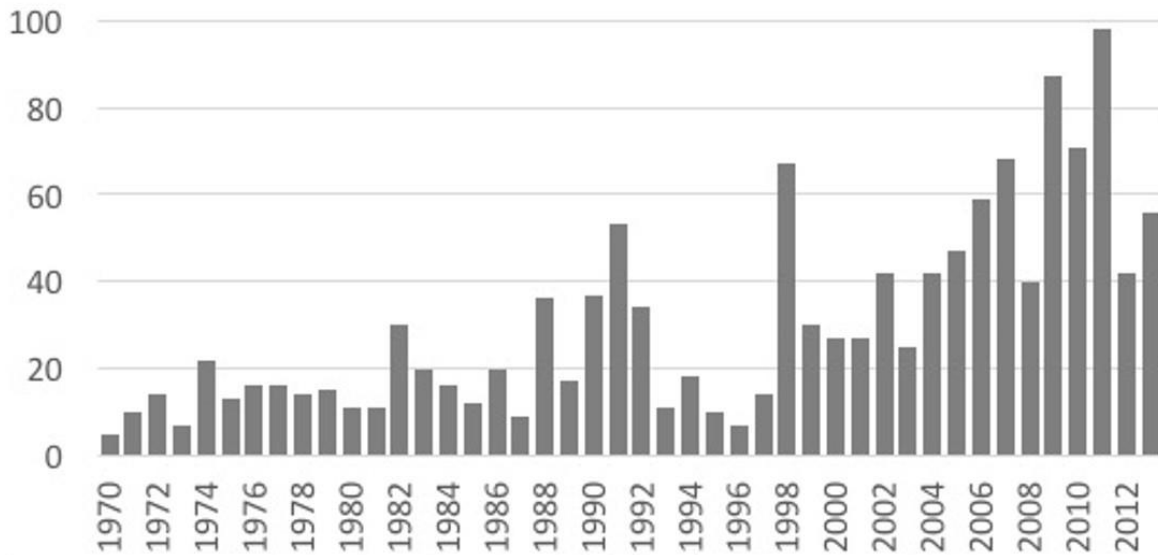


Figura 27. Inundaciones en la ZMVM

Número de eventos de inundaciones reportados en las regiones de la Ciudad de México y el Estado de México entre 1970 y 2013 (fuente: Desinventar 2019).

La mayor propensión a inundaciones se da en las partes bajas de las montañas y parece incrementarse en donde el proceso de cambio de uso de suelo ha sido mayor, es decir, al poniente de la ZMVM (Fig. 28). Lo anterior indica que las ciudades crean alta vulnerabilidad que genera niveles de riesgo de inundación altos que se materializan en más inundaciones.

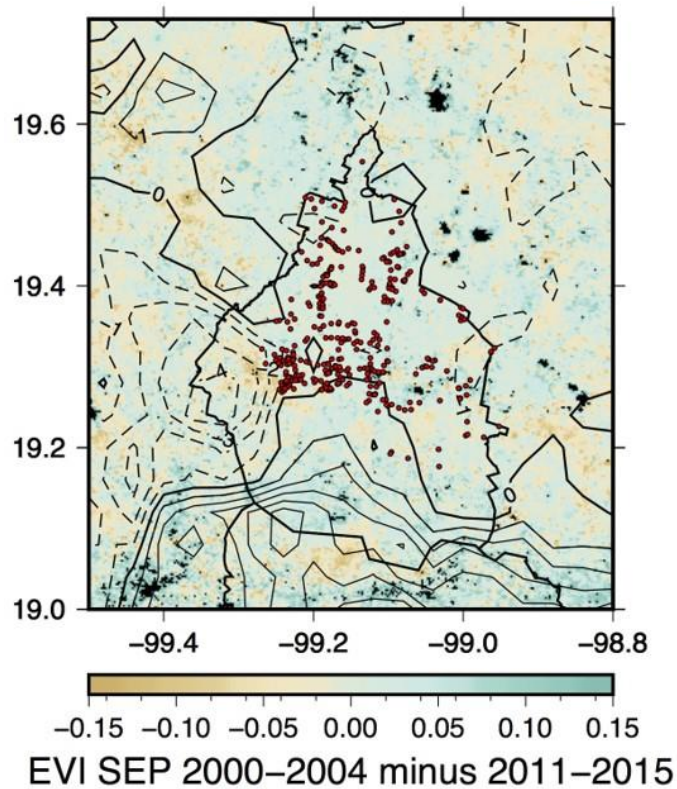


Figura 28. Cambios en el índice de vegetación EVI

Diferencia en el Índice de Vegetación Mejorada (EVI) alrededor de la ZMVM para la condición promedio de septiembre, entre los períodos 2000–2004 y 2012–2016. Las líneas negras indican la tendencia para el período 1950-2015 en el número de eventos de precipitación por año por encima de 20 mm/día. Los puntos rojos muestran la ubicación de los eventos de inundaciones urbanas reportados entre 2007 y 2011.

En resumen, el riesgo de inundaciones urbanas debido al aumento de la actividad de precipitaciones extremas o al aumento de la vulnerabilidad tienden a generar más desastres de este tipo en los últimos años. Se observa una gran cantidad de inundaciones urbanas en la parte centro occidental de la ZMVM, principalmente por la convergencia de escorrentías de las montañas (Zúñiga y Magaña, 2018).

Identificar qué es la vulnerabilidad, el factor de riesgo que más contribuye a resultar en desastres, como las inundaciones, permite proponer estrategias de gestión de

riesgo que se enfocan más en la vulnerabilidad que en el peligro para disminuir el número de desastres.

4. Discusión

4.1 Desarrollo urbano y construcción del riesgo climático

A partir de las últimas décadas del pasado siglo, el fenómeno de urbanización a nivel global, se disparó. Las ciudades grandes se fueron extendiendo por el territorio hasta alcanzar poblaciones de más de 10 millones de habitantes, a las que se les ha denominado megaciudades. Mientras, las ciudades medianas, también en continuo crecimiento, siguen el modelo de metropolización, es decir, se extiende la urbanización entorno a un centro económico importante, cada vez más lejano. En general, el fenómeno de crecimiento se manifiesta en todos los continentes, siendo en los países en desarrollo un problema complejo asociado a la pobreza en varios sentidos.

Desde finales del siglo pasado, a nivel global se ha presentado una tendencia creciente de expansión de las ciudades hacia la periferia y el establecimiento de asentamientos irregulares principalmente por poblaciones de bajos recursos y que recién se incorporan a la vida citadina.

Se prevé que para el año 2030, más del 50% de la población mundial habitará en ciudades, ya que el modelo imperante de desarrollo económico dicta un modo de vida urbano. En México, la realidad supera este porcentaje, actualmente el 80% de la población ya habita en ciudades (INEGI, 2014), principalmente en aquellas con más de 1 millón de habitantes. El desafío que ello representa es grande ya que dotar de empleo, vivienda, servicios públicos y un ambiente sano con la rapidez que se requiere, es caro y complicado.

Adicionalmente a la problemática que conllevan estas ciudades con crecimiento expansivo, se suman aspectos socioambientales como el cambio climático, exclusión social e iniquidad (UNHABITAT, 2016), lo que requiere una agenda especial para la atención de estos problemas urbanos que ya empiezan a padecerse en países con grandes desventajas.

En la Zona Metropolitana del Valle de México, las viviendas de la periferia que se han ido anexando poco a poco a la urbe son producto de inmobiliarias que no consideran importantes las áreas verdes y como resultado, se tienen grandes espacios grises hechos sólo de concreto y asfalto que no proveen servicios ecosistémicos. Por otro lado, existen asentamientos irregulares que son construidos por los mismos habitantes, con características paupérrimas y sobre terrenos poco apropiados para casa-habitación, lo que en muchos casos genera vulnerabilidad ante eventos hidrometeorológicos, no solo en el ámbito local, sino incluyendo el regional, al establecerse en las periferias de las urbes afectando los alrededores.

Un aspecto importante que vale la pena mencionar es la ocupación del suelo de conservación por asentamientos irregulares. Las alcaldías de Milpa Alta, Tlalpan, Xochimilco y Tláhuac, respectivamente, presentan la mayor superficie de suelo ocupado por asentamientos irregulares dentro de la Ciudad de México con el 86% del total de ocupación por asentamientos irregulares (PAOT, 2016).

Con ello, además de poner en riesgo a la población de los mismos asentamientos, se afecta a toda la Zona Metropolitana al disminuir la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos como la infiltración de agua al acuífero, el amortiguamiento

de temperaturas, el filtro de contaminantes y la disminución de escurrimientos para evitar inundaciones en las partes bajas de la cuenca. Al parecer, la corrupción al entregar permisos de construcción o la omisión ante la ocupación del suelo de conservación, permean a las autoridades en los diferentes niveles de gobierno, llevando con ello a generar problemas que después se intentan atender con base en tecnología cara y poco eficiente, así como responder cuestionamientos culpando al cambio climático eludiendo su responsabilidad.

Lo mismo ocurre en las zonas más densamente pobladas de la región de estudio. Como ya ha sido abordado, el problema de la ICU es dinámico y a medida que se va densificando el suelo urbano, más se expande. Hasta ahora, no se ha puesto la debida atención en los impactos que la ICU conlleva, por ejemplo el aumento de enfermedades diarreicas, la aparición de enfermedades transmitidas por vectores y, en casos extremos, la muerte por golpe de calor en poblaciones vulnerables.

4.2 La dinámica de las ondas de calor

Como se mencionó en el capítulo anterior, las ondas de calor son episodios de 2 o más días con temperaturas arriba de 30°C (Jáuregui, 2000). De acuerdo con los estudios realizados, el número de días al año que presentan estas características se han incrementado a partir de los años 90, mientras que el año con mayor presencia de ondas de calor fue 1998, que registró más de 50 días, ese año se presentó el fenómeno El Niño en una fase intensa. Sin embargo, para el año de 1983, catalogado también como año Niño, el número de días con episodios de calor extremo no superó los 25. En orden jerárquico, después del año 1998, le siguió

1991, un año neutro que tuvo 40 días con altas temperaturas, en el periodo comprendido de 1877-2014.

Al respecto podría mencionarse (bajo un enfoque naturalista), que el aumento de las temperaturas en la Ciudad de México y su área metropolitana, son resultado del calentamiento global, lo cual no es tan evidente, ya que la tendencia positiva de calentamiento coincide con diversos cambios en el uso del suelo que, a su vez, es diferente en las regiones de la ciudad. Por tanto, se pueden apreciar mayores incrementos de temperatura hacia el centro y oriente, regiones en las que el comportamiento diurno de la temperatura presenta rangos extremos al ser zonas urbanas densas, con poca vegetación, lo que incrementa albedo y calor sensible. Sin embargo, la presencia de la isla de calor al combinarse con la aparición de una onda de calor, va a generar impactos más fuertes a la población, es por ello que un análisis de riesgo permite indagar de mejor manera, los elementos que componen el proceso así como donde hacer cambios para disminuir impactos. En este sentido, habrá ondas de calor generadas de manera artificial y no derivadas de la dinámica atmosférica. Es por ello que, las formas en las que se urbaniza determinan en gran medida, el tipo de clima regional, o zonal (Stewart y Oke, 2012).

En lapsos de tiempo más significativos, como en el caso de la serie de tiempo de la estación de Tacubaya (Fig. 7), una vez que se obtiene la climatología (con el filtro pasabajo), se observa como las bajas frecuencias denotan estadios que coinciden con los cambios de uso del suelo, mientras que las altas frecuencias denotan la variación en periodos más cortos de tiempo, que indican la presencia de ondas de

calor, sean de condiciones naturales atmosféricas o por la presencia de la isla de calor.

En las gráficas se observan altas frecuencias o impulsos, condicionados en parte por la ocurrencia de fenómenos naturales y en otra parte por el ambiente que rodea a la estación o espacio donde se registran los datos. Con respecto a las bajas frecuencias que a través del tiempo van incrementando su valor, se puede decir que estos son los cambios en los patrones del clima que lentamente van sucediendo por la pérdida de vegetación y con ello, de servicios ecosistémicos. Lo que se registra en Tacubaya es solo un ejemplo de largo periodo, en el cual por medio de su historia ambiental se constatan las respuestas meteorológicas al hacer determinado uso del suelo. Las bajas frecuencias, por tanto, sí indican un cambio climático a nivel local, que para este caso, es más intenso que el que correspondería al llamado cambio climático global.

Por otro lado, como se vio en los mapas de temperatura, la superficie que abarca el umbral de las ondas de calor va aumentando en el tiempo y de manera más significativa, en las áreas de la ciudad que presentan mayor densidad de población y de construcción.

Es por ello que, aunque existan eventos de la dinámica atmosférica que inciden directamente sobre la ZMVM, forzantes internos del sistema como es la urbanización, afectan con mayor frecuencia y cambian los patrones y rangos en que una variable del clima puede generar procesos que conllevan modificaciones en

todo el sistema, no solo ambiental, sino incluso, los sistemas sociales que son afectados.

4.3 Las implicaciones climáticas de la Isla de Calor

Además de los impactos negativos que presenta por sí misma la ICU en el Valle de México, se encuentra asociada a su formación, una mayor dispersión de contaminantes. Al ensancharse la atmósfera o incrementarse la capa límite urbana por efecto del calor, se favorece que los contaminantes se dispersen porque hay mayor espacio. Además, como la intensidad de la ICU es mayor en primavera, con la escasa humedad de la temporada, es difícil contrarrestar la dispersión de los contaminantes. Algunos de los efectos asociados a estos procesos, pueden ser el aumento de enfermedades respiratorias en niños (Ubilla y Yohannessen, 2017).

Debido a que el sistema climático está implicado con flujos, la isla de calor urbana formada en la ZMVM ha alterado otras variables del clima, como la humedad, la precipitación y la dirección de los vientos.

De acuerdo con la ley de Clausius-Clapeyron dentro de la burbuja más cálida puede haber mayor cantidad de agua, siempre que exista una fuente de abastecimiento, en este caso el Golfo de México, que provee de humedad hasta el Altiplano, donde se ubica la zona de estudio, el Valle de México puede recibir aire húmedo sobre todo en el verano. Por tanto, la atmósfera de la zona de trabajo se encuentra con alta humedad en esta época del año, originando aguaceros intensos.

El incremento del peligro por lluvias intensas es derivado de una mayor humedad atmosférica y menor estabilidad por el calentamiento de superficie, condiciones favorables para el desarrollo de nubes convectivas profundas y lluvias intensas.

Como se pudo notar en la gráfica de Tacubaya (Fig. 17) a partir de que comienza a haber cambios en la temperatura máxima, las lluvias de verano también se incrementan, de tal manera que parecen correlacionarse.

Por otro lado, la dirección e intensidad de los vientos también pueden estar directamente relacionadas con la ICU. Debido a que el calor sensible de las superficies de los materiales con que se urbaniza proporciona una temperatura mayor que la que se encuentra en el ambiente, se pueden originar movimientos convectivos por presentarse condiciones de poca estabilidad atmosférica. Como resultado las masas de aire de diferentes temperaturas y de diferente presión, chocan para equilibrar el sistema, lo que conlleva modificación de la dirección del viento e incremento de su velocidad.

4.4 La dinámica de la vulnerabilidad

Estudios de vulnerabilidad ante cambio climático se han abordado anteriormente de manera numerosa. Existen variables de vulnerabilidad de diferentes tipos como son sociales, económicas y ambientales, sin embargo, la mayoría la caracteriza como una condición estable, pasiva que no varía en el tiempo. A diferencia de otros estudios de vulnerabilidad, en el presente trabajo se realizaron análisis en diferentes

periodos para hacer la validación a través de los impactos históricos, es decir, la vulnerabilidad fue evaluada considerando que en el tiempo puede cambiar. A la vez, se detectaron los principales factores de vulnerabilidad que permiten la ocurrencia de mayores daños al combinarse con el peligro.

En general, la modificación de los paisajes repercute en cambios de vulnerabilidad, pero de acuerdo al fenómeno climático que se estudie, esos cambios favorecerán o disminuirán características o condiciones de vulnerabilidad. Con el rápido crecimiento de las ciudades, se deforesta y construyen edificios casi instantáneamente. De este modo, se modifican las características en breves periodos de tiempo, que no frecuentemente se miden o se datan y por lo tanto, al hacer estudios de riesgo con vulnerabilidad estática, se omite el factor dinámico y con ello, los resultados no serán los más aproximados a la realidad.

Cabe aclarar que en este trabajo, se trabajó lo más apegado a este hecho, ya que los datos con que se cuenta para hacer el estudio de vulnerabilidad no fueron los más desagregados o los óptimos, por ejemplo, el estado de salud de los habitantes de la población podría haber arrojado resultados más contundentes a la hora de validar la propuesta con los impactos registrados. Es así como esta aproximación deja abiertas otras posibilidades de trabajar, pero teniendo como base los resultados aquí expuestos.

Ahora, con el censo de población de 2020, es posible que se agreguen nuevas variables que puedan ayudar para próximos estudios de vulnerabilidad ante ondas

de calor, no obstante que para cada lugar y para cada fenómeno meteorológico, los factores de vulnerabilidad son específicos.

Sin embargo, de acuerdo con las proyecciones demográficas de la ZMVM, se espera que la población continúe creciendo y con ello, la construcción de viviendas, principalmente en las periferias de la ciudad, lo que indica mayores extensiones urbanas con poca consideración de permitir la existencia de servicios ecosistémicos que amortigüen los impactos climáticos que con ello aparecerán. Considerando un futuro negativo, es posible que las temperaturas altas extremas se presenten con mayor frecuencia, como resultado de la densidad urbana y del modelo de crecimiento urbano impuesto por el capitalismo.

4. 5 El futuro del riesgo climático

A partir del entendimiento sobre riesgo climático se pueden explicar los procesos ocurridos, algunos de ellos convertidos en desastres. Además, mediante este enfoque es posible proponer acciones estructurales que permitan disminuir la vulnerabilidad y hasta cierto punto, también disminuir el peligro.

Para el área metropolitana de la Ciudad de México, se espera que la población capitalina crezca 35% entre 2016 y 2030, lo que requerirá un estimado de 50,000 casas nuevas cada año para satisfacer las necesidades de vivienda (IFC, Banco Mundial, 2021). Esto representa una demanda de suelo que, aunado a la ocupación ya existente, tendrá impactos en el riesgo climático de la zona.

La ZMVM ha incrementado el riesgo climático principalmente por los efectos de la Isla de Calor Urbana y el incremento de la exposición de la población que vive en

condiciones vulnerables, al parecer, en un futuro las condiciones no mejorarán, puesto que las políticas siguen encaminándose a la construcción de riesgos climáticos.

En general, se espera que las ciudades de la República Mexicana sigan creciendo de la forma en que lo hace la Ciudad de México, razón por la cual es importante incorporar en la planeación urbana, análisis de riesgos climáticos y de esta manera, evitar riesgos críticos asociados al clima.

4.6 La Gestión del Riesgo de Desastres

Construir modelos de riesgo climático requiere de una ardua labor por entender procesos, caracterizar los múltiples factores que involucran, interpretar la dinámica de peligro y vulnerabilidad, y muy importante, mostrar que dichos modelos explican la ocurrencia de desastres o los impactos del tiempo y del clima en la sociedad. Hasta hoy, gran parte del trabajo sobre riesgo climático en ambientes urbanos se reduce a recuentos de datos, suposiciones sobre vulnerabilidad, y asociaciones descriptivas de las relaciones cambio climático - impactos. Son pocos los esfuerzos por cuantificar, pero adquieren importancia cuando se piensa en las posibilidades que se abren de gestionar el riesgo y reducir la frecuencia o la magnitud de los desastres, mediante una gestión de los factores de vulnerabilidad. La Gestión del Riesgo de Desastres es un proceso complejo que conlleva acciones y actores en distintos niveles de gobierno, en sectores de la sociedad (academia, organizaciones civiles, estudiantes, etc), de manera transversal, que en conjunto, lleven a la reducción del riesgo.

A través de un análisis cuantitativo de riesgo climático es posible generar propuestas de gestión para disminuir la actividad de desastres asociados al clima. En el caso de riesgo climático, es identificando los factores de vulnerabilidad y su importancia en el riesgo, que pueden definirse acciones para reducir los impactos de eventos extremos de clima y tiempo. Cuantificar, tanto al peligro como a la vulnerabilidad, resulta útil para conocer las condiciones que propician la ocurrencia de eventos de desastre e inducir una nueva forma de ver al desastre, que no caiga en el enfoque naturalista. Considerar la dinámica de la vulnerabilidad y del peligro, permite un mejor entendimiento del sistema para proponer acciones eficientes que permitan construir resistencia a los peligros y mejorar el funcionamiento de los socio-ecosistemas.

Es importante mencionar que, para conseguir una disminución de riesgo, o estar en niveles de riesgo aceptable, deben considerarse un abanico de opciones que actúen en conjunto de forma no-redundante para mostrar cuantitativamente que el riesgo y los desastres disminuyen, en un proceso de reducción de desastres que sea comunicado a la sociedad. No hay solo una solución a la disminución del riesgo, sino una serie de acciones a diferentes escalas.

Hoy resulta claro que la pérdida de servicios ecosistémicos en las zonas urbanas tiene un alto costo que no logra ser reemplazado con sistemas de infraestructura o de tipo ingenieril. La recuperación, al menos parcial, de los servicios que proveen árboles, es cada vez más reconocida como una aproximación a la gestión de riesgos

con múltiples co-beneficios. En el presente análisis, se ha mostrado que la vegetación que se pierde incrementa el riesgo de impactos sobre una sociedad con poco conocimiento de la importancia de la vegetación en sus vidas. Es por ello, que los programas de reforestación urbana o en la periferia de la ciudad deben ser explicados en toda su dimensión, pues muchas veces, el desinterés de la población por parques o jardines radica en el desconocimiento de los beneficios que estos brindan.

En el caso de la ZMVM, la pérdida de vegetación ha sido significativa en años recientes, pues se ha promovido un modelo de beneficio, especulación y lucro sólo para aquellos que toman decisiones sobre el uso del suelo. El modelo de crecimiento fragmentado no sólo limita las capacidades de proveer servicios básicos a la población, sino que la expone a riesgos hidro-meteorológicos que cada vez resultan de mayor magnitud.

La aproximación al diagnóstico del riesgo climático también permite apartarse del paradigma naturalista, tan socorrido en las diversas esferas de gobierno y en los medios de comunicación, lo cual genera que un gobierno inoperante encuentre justificación de sus errores en una sociedad pasiva. Los estudios de riesgo climático urbano deberán cobrar mayor importancia como estrategias de cultura para la autogestión de riesgo entre la población. Así, la academia debe buscar formas de comunicar adecuadamente el concepto de riesgo, sin abusar de tecnicismos, para que las acciones de gestión se enmarquen en un verdadero contexto de gobernanza.

El caso de la ICU en la ZMVM resulta paradigmático, en cuanto a un proceso de calentamiento por pérdida severa de vegetación y permisividad de autoridades ante asentamientos irregulares que exponen a la población a peligros meteorológicos que afectan su salud, sus bienes y su calidad de vida en general. Los dos ejemplos desarrollados en el trabajo, ante los peligros por ondas de calor o lluvias intensas, muestran que es urgente un programa de cultura del riesgo entre la población, para que se exija a autoridades un programa de ordenamiento territorial que tome en cuenta los riesgos que se enfrentan. Sólo con un desarrollo científico sólido en materia de riesgo climático urbano, se podrá convencer de las ventajas de modificar el modelo de desarrollo seguido hasta ahora.

5. Conclusiones y recomendaciones

La expansión urbana de la ZMVM ha resultado en una isla de calor urbana que tiende a aumentar la magnitud y frecuencia de los episodios extremadamente cálidos. Las condiciones ambientales y socioeconómicas de esta área urbana crean vulnerabilidad en la población a ondas de calor. Durante la primavera, el calor por encima de los 30°C puede aumentar el riesgo de brotes de EDAs en las partes centro-oriental y nororiental de la ZMVM, caracterizadas como las zonas más vulnerables por la condición económica precaria de su población, su limitado acceso a servicios básicos, o su desconocimiento del significado de riesgo en su vida diaria.

Un modelo de desarrollo urbano de crecimiento horizontal reduce o elimina la vegetación natural y da como resultado temperaturas más cálidas y e intensificación de la isla de calor urbana. La mayoría de las veces son los asentamientos irregulares, en la periferia de la ciudad, con condiciones socio-económicas bajas y acceso limitado al agua potable, lo que provoca la degradación ambiental y hace que las personas sufran los mayores impactos a los períodos cálidos. Esto es común en la expansión urbana de la ZMVM, en donde la ingobernabilidad sobre los procesos de ocupación del territorio, exacerbaban la vulnerabilidad social al aumentar la exposición, la pérdida de los servicios ecosistémicos y ocurrencia de desastres.

El presente trabajo muestra que: i) la expansión de la ZMVM ha resultado en un aumento de la temperatura máxima (media y extrema), ii) la pérdida de vegetación natural en el proceso de urbanización genera cambios de temperatura que, en

combinación con la actividad de las ondas de calor, resultan en un peligro natural para la salud de las personas, iii) la vulnerabilidad a las olas de calor y el riesgo de EDAs en las partes este y norte de la zona metropolitana se relacionan principalmente con la ICU y malas condiciones socioeconómicas. En resumen, el modelo de crecimiento urbano en la mayor parte de las ciudades medias y grandes de México incrementa los peligros meteorológicos, lo que se traduce en un riesgo climático que es intolerable con mayor frecuencia y por tanto, en mayor número de desastres.

El reconocimiento de los procesos de construcción de riesgo y su materialización en desastres permite explorar opciones de adaptación a la forma de cambio climático que representa la ICU. Así, este análisis puede servir para desarrollar un sistema de alerta temprana de salud por calor para la ZMVM. Saber que posterior a la ocurrencia de una onda cálida pueden presentarse brotes de EDAs en ciertas zonas de la ciudad podría servir para que autoridades de salud implementen acciones de comunicación entre la población, para que se preparen hospitales a atender un mayor número de casos, contando con médicos y medicinas para atender de forma eficiente a los afectados, para garantizar servicios básicos que ayuden a preservar la salud de las personas, y para que entre gobierno y sociedad se construya un nuevo modelo de ocupación del territorio.

Las estimaciones del riesgo climático basadas en las probabilidades de temperaturas más altas, por encima de un umbral crítico, deberían servir para diseñar medidas estructurales para gestionar el riesgo, principalmente en relación con la mitigación de la ICU. Pero por lo pronto deben también existir medidas

coyunturales para gestionar el riesgo. Por ejemplo, cuando el riesgo se calcula en función de las condiciones observadas para un día o una semana en particular o según las previsiones meteorológicas, una respuesta al riesgo crítico puede basarse en un sistema de alerta temprana. Los resultados del presente estudio indican que se puede emitir una advertencia temprana para los más vulnerables de la ZMVM, con una semana de anticipación, particularmente para las regiones oriente y norte de la urbe. Los pronósticos meteorológicos mejorados y la información sobre el riesgo climático son elementos importantes para enfrentar el aumento en la frecuencia y magnitud de las ondas de calor. Si bien los episodios cálidos ocurren en la mayoría de las grandes urbes, las estrategias de adaptación deben implementarse en las regiones de alto riesgo, como lo sugiere la Organización Mundial de la Salud (2019), y pueden implementarse con base en un enfoque de riesgo, una vez que una estrategia de comunicación adecuada es desarrollada.

La gestión del riesgo climático también requiere la mitigación de los períodos cálidos al reducir la magnitud de la ICU, por ejemplo, mediante la reforestación urbana en la parte oriental de la ZMVM. También requiere adaptación, lo que implica abordar los factores de vulnerabilidad, como la información a las personas sobre las condiciones que favorecen las EDAs. No todas las condiciones socioeconómicas que resultan en vulnerabilidad pueden modificarse para reducir el riesgo, pero su cuantificación es necesaria para determinar cuándo se alcanzan altos niveles de riesgo.

La recuperación de servicios ecosistémicos de regulación hídrica en la parte poniente de la ciudad es un problema que debe ser abordado. Si bien los

planeamientos de infraestructura hidráulica para enfrentar el problema de inundaciones se han enfocado en construcción de túneles emisores de agua de escurrimientos, es claro que una solución más económica y eficiente pasa por reconocer el valor de los servicios ambientales en la cuenca.

La mayoría de las ciudades medianas en México siguen un patrón de crecimiento urbano similar al observado en el ZMVM, en el cual la construcción de infraestructura (edificios, carreteras, etc.) es más importante que el mantenimiento de los servicios naturales del ecosistema (conservación de árboles y vegetación natural). Un ejercicio de atribución del ICU puede servir para determinar dónde se puede implementar la reforestación urbana u otras estrategias de mitigación (por ejemplo, recuperación de ríos) y con ello disminuir los peligros climáticos y el riesgo. Dichos estudios serían de gran beneficio para una sociedad interesada en la autogestión del riesgo climático.

Es necesario que, en un futuro cercano, se prepare una mejor información sobre los impactos directos del calor en las personas de la ZMVM, como el relacionado con el riesgo de golpe de calor. La adaptación a la ICU o al cambio climático en general, requiere redefinir las estrategias de asentamientos humanos, principalmente en la periferia del área urbana, al mejorar su acceso a mejores condiciones de vida ambiental y económica. El interés del gobierno mexicano en el cambio climático también debe abordar el problema de la ICU mediante el establecimiento de programas de reforestación urbana o la mejora de los servicios de salud pública en las regiones vulnerables. Los escenarios de riesgo climático en megaciudades

pueden servir para planificar mejor el uso de la tierra en ciudades medianas que experimentan un rápido crecimiento demográfico.

5.1 La planeación urbana con consideraciones de riesgo

A través del estudio de los procesos que generan desastres y afectaciones en localidades urbanas, se concluye que debido a que el riesgo es socialmente construido, es necesario gestionar el mismo a través de diferentes medios, uno de los cuales es la planeación urbana. Con esta herramienta, se puede prever impactos negativos de la urbanización, como los relacionados con el clima y fenómenos meteorológicos.

En México, con la emisión de la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano (DOF, 2016), se han establecido artículos que dan pie a considerar elementos naturales como la vegetación, dentro de los desarrollos urbanos que están en crecimiento (Art. 9 de la Ley General de AHOTDU) a nivel municipal. En dicha ley, se considera la Gestión Integral del Riesgo, aunque en la práctica ésta no se lleve a cabo.

En el contexto actual, resulta necesario considerar que las islas de calor van incrementando su superficie, y las ciudades están creciendo, a la vez, las necesidades de confort también aumentan. El aire acondicionado poco a poco va ganando terreno en los satisfactores para un hogar confortable, por consiguiente, el incremento en las demandas de energía para refrescar y refrigerar alimentos vendrá

a sumarse en la liberación de calor, junto con las correspondientes de transportes e industria. Las consecuencias pueden exacerbar la ICU.

Con el advenimiento del crecimiento de las ciudades y con una población cada vez más urbana, se requiere considerar puntos importantes que permitan disminuir riesgos climáticos a los pobladores, así como conservar la salud pública. El ordenamiento ecológico-territorial de las ciudades es imprescindible. En este trabajo se demostró que la pérdida de servicios ecosistémicos conlleva un aumento de la isla de calor, pero además, al urbanizar partes altas alrededor de la ciudad, se pierden servicios ecosistémicos que hacen de las partes bajas, zonas más vulnerables a inundaciones, por ejemplo.

El ordenamiento ecológico o la planeación urbana debiera considerar elementos de infraestructura verde, por muy pequeños que sean, la suma de todos pueden hacer la diferencia entre disponer de servicios ecosistémicos o no. De igual manera, la incorporación de cuerpos de agua tanto artificiales como naturales (ríos, fuentes), estos últimos sin tapar, ayudan en la regulación de temperaturas en el corto plazo.

5.2 Atlas de riesgo

Como resultado de las reflexiones sobre la presente investigación, se ha pensado en el desarrollo de nuevos conceptos o nuevas formas de realizar los Atlas de Riesgos. En primer lugar, dado que tanto la vulnerabilidad como el peligro son los principales factores del riesgo y ambos son dinámicos, a través de las Tecnologías de la Información y la Comunicación o TICs, es posible mantener sistemas virtuales

de atlas que permitan representar esa dinámica del riesgo. En otras palabras, actualizar cada determinado lapso de tiempo o cada modificación en el paisaje urbano o rural, para obtener en el espacio, los posibles cambios en cada componente y su resultado en la función del riesgo.

En segundo lugar, dado que se trabajó a nivel metropolitano, también se concluyó que las divisiones políticas nada tienen que ver con el comportamiento del ecosistema urbano. Considerar al ecosistema urbano sin fronteras políticas, permite visualizar los procesos que generan o disminuyen tanto vulnerabilidad como riesgo, así como los alcances de cada uno. Trabajar un atlas de riesgos a nivel regional o metropolitanos para el caso de ciudades grandes, resulta en un mejor entendimiento sobre los procesos que dan lugar a desastres.

Este mismo nuevo concepto de Atlas podría ser una herramienta clave en los protocolos de Gestión de Riesgo y para Sistemas de Alerta Temprana. Así mismo, este Atlas podría ser utilizado para llevar a cabo planeaciones urbanas, ya que como se ha mencionado, se espera que las ciudades continúen creciendo de manera desordenada y sin consideraciones de riesgos.

6. Referencias

- Aguilar, A. G. (2002). Las Mega-ciudades y las periferias expandidas. *EURE (Santiago)*, 28 (85), 121-149.
<https://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612002008500007>
- Ávila, S. (1999). La producción de ladrillo y las minas de arena en la prefectura de Tacubaya, 1880-1920. En C. Maldonado, *Tacubaya, pasado y presente*. México D. F.: Colección Ahuehuate. 244.
- Ballinas, M. and V. Barradas. (2016). The urban three as a tool to mitigate the URban Heat Island in Mexico City. *Journal of Environmental Quality*. 157-166.
- Below R. y P. Wallemacq. (2018). *Annual Disaster Statistical Review*. CRED.
Bolund y Hunhammar. (1999). Ecosystem Services in Urban Areas. *Ecological Economics*, 29, 293-301. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00013-0)
- Bornstein y Lin. (2000). Urban Heat Islands and Summertime Convective Thunderstorms in Atlanta: three case studies. *Atmospheric Environment*. 34,507-516.
[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00374-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00374-X)
- Breña-Pujol, A. F. (2019). *Hidrología Urbana*. Universidad Autónoma Metropolitana (e-book) obtenido de:
<https://uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/libro2-hidrologia/libro-web/index.htm>
- Buchhorn et al. (2019). *Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: Epoch 2015: Globe*. Copernicus Land Monitoring Service. Obtenido de <https://zenodo.org/record/3243509#.YUy8sm1Bzs0>
- Bustamante y García. (1999). *Tacubaya en la memoria*. México, D. F.: Gobierno de la Ciudad. 143
- Cardona, O. D. (2012). *Determinants of Risk: Exposure and vulnerability. Managing the risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, C. B. Cambridge University Press, 65-108.
- Changnon y Vogel. (1981). Hydroclimatological characteristics of isolated severe rainstorms. *Water Resources Research*. 1694-1700. <https://doi.org/10.1029/WR017i006p01694>
- Changnon, S. A. (1992). Inadvertent Weather Modification in URban Areas: LEssons for Global Climate Change. *Bulletin of the American Meterological Society*, 619-627.

- Checkley et al. (2000). Effects of El Niño and Ambient Temperature on Hospital Admissions for Diarrhoeal Diseases in Peruvian Children. *Lancet*, 442-450.
- Chen et al. (2008). Sustainable Urban Form For Chinese Compact Cities: Challenges of a Rapid Urbanized Economy. *Habitat International*, 28-40.
- Cid Ortiz, et al. (2012). Percepción del Riesgo en relación con capacidades de auto protección y autogestión, como elementos relevantes en la reducción de la vulnerabilidad en la ciudad de La Serena . *INVI*, 105-142.
- CMNUCC. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Nueva York: Naciones Unidas. 26. Obtenido de <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- CMNUCC. (2015). *Convención Marco de las Naciones Unidas*. Obtenido de https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- COFEPRIS. (2018). *Bases de datos sobre egresos hospitalarios*. 17 de enero de 2019. Obtenido de <https://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/historico-boletin-epidemiologico>
- CONAPO. (2010). *Consejo Nacional de Población*. Crecimiento poblacional. 25 de septiembre de 2018. Obtenido de <https://www.gob.mx/conapo/documentos/visualizador-de-informacion-demografica-para-la-republica-mexicana-1950-2050-y-las-entidades-federativas-1970-2050?idiom=es>
- Cotton, W. R. and Sr. R. A. Pielke. (2007). *Human impacts on Weather and Climate*. London: Cambridge University Press. 327.
- Cressman, G. P. (1959). An Operational Objective Analysis System. *Monthly Weather Review*, 367-374.
- Cueto, et al. (2010). Heat waves and heat days un an arid city in the northwest of México: current trends and in climate change scenarios. *International Journal of Meteorology* , 335-345.
- Delgado, J. (1988). De los anillos a la segregación: la Ciudad de México 1950-1987. *Simposio Mexicano-Polaco*. México, D. F.
- DesInventar. (2019). *Desinventar*. Website proyecto México 13 de junio de 2019. Obtenido de <https://www.desinventar.org/>
- Díaz et al. (2014). Mortalidad por Calor Natural Excesivo en el Noreste de México: Condicionantes Sociales Asociados a esta Causa de Muerte. *Frontera Norte*, 155-177.

- Díaz y Markgraf. (2000). *El Niño and the Southern Oscillation: Multiscale Variability and Global and Regional Impacts*. London: Cambridge. 463-486. Doi:10.1017/CBO9780511573125.014
- DiBonaventura et al. (2018). Obesity in Mexico: Prevalence, Comorbidities, Associations with Patient Outcomes, and Treatment Experience. *Diabetes, Metab. Syndr.*, 1-10.
- Dixon y Mote. (2003). Patterns and Causes of Atlanta's Urban Heat Islands- Island-Initiated Precipitation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1273-1284.
- DOF. (2016). Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano. *Diario Oficial de la Federación*. 28 de noviembre de 2016
- Domínguez, J. (2016). Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 77-93.
- FAO. (2021). *FAO Forestry Newsroom*. 13 de septiembre de 2021. Obtenido de <http://www.fao.org/forestry/news/99149/en/>
- Gaffin et al. (2008). Variations in New York city's urban heat island strength over time and space. *Theor Appl Climatology*, 94. 1-11. doi:10.1007/s00704-007-0368-3.
- García, Tejeda y Jáuregui. (2010). Heat waves and heat days in an arid city in the northwest of México: current trends and in climate change scenarios. *International Journal of Meteorology*, 335-345.
- HABITAT, ONU. (2016). *Nueva Agenda Urbana*. Quito : Naciones Unidas. 54. Disponible en: <http://uploads.habitat3.org/hb3/NUA-Spanish.pdf>
- Harlan et al. (2006). Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. *Social, Science and Medecine*, 2847-2863.
- Hastings y Dunbar. (1999). *International Research Institute for Climate and Society*. Obtenido de International Research Institute: <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NGDC/.GLOBE/>
- Herrera, E. (2020). Interacción de transientes-flujo medio atmosférico sobre las albercas de agua caliente de las Américas. *Tesis*. UNAM. 206.
- Hodge, M. W. (1956). Superadiabatic Lapse Rates of Temperature in Radiosonde Observations. *Monthly Weather Review*, 103-106.

- Howard, L. (1820). *The Climate of London*. London.
- Huete et al. (2002). Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the Modis vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 195-213.
- Hussein et al. (2017). Spatiotemporal assessment of vegetation indices and land cover for Erbil City and its surrounding using MODIS imageries. *Environ. Geogr.*, 31-39.
- IFC, Banco Mundial. (2021). *International Finance Corporation*. 2 de marzo de 2021. Obtenido de International Finance Corporation: <https://pressroom.ifc.org/all/pages/PressReleaseAll.aspx>
- INEGI. (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. 18 de junio de 2013. Obtenido de INEGI: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/default.html#Publicaciones>
- IPCC. (2007). *Resumen para responsables de políticas*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- IPCC. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. En *Special Report of Working Groups I and II of the IPCC*. New York: Cambridge. 109-230.
- IRI. (2018). *International Research Institute for Climate and Society*. 25 de marzo de 2019. Obtenido de http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.USGS/.LandDAAC/.MODIS/.version_006/
- Jáuregui E. y E. Romales. (1996). Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 3383-3389.
- Jáuregui, E. (1992). La Isla de Calor Urbano de la Ciudad de México a finales del siglo XIX. *Atmósfera*, 31-39.
- Jáuregui, E. (2000). *El Clima de la Ciudad de México*. México, D. F.: Plaza y Valdés. 131.
- Jáuregui, E. (2009). The heat spells of Mexico City. *Investigaciones Geográficas*, 71-76.
- Jáuregui, E. y A. Tejeda. (1998). Urban-rural Humidity Contrasts in Mexico City. *International Journal of Climatology*, 187-196.
- Jaramillo, et al. (2011). Golpe de calor: Un problema de Salud Pública en Mexicali. *Salud Pública de México*, 285-286.

- Kalnay, E. y M. Cai. (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 528-531.
- Kang et al. (2021). Impactos of Urbanization on Variations of Extreme Precipitation over the Yangtze River Delta. *Water*, 150.
- Landsberg. (1956). The climate of towns. *Man's Role in Changing the Face of the Earth*, 584-606.
- Magaña y Galván. (2010). Detección y Atribución de Cambio Climático a Escala Regional. *Realidad, datos y espacio. Revista Internacional de estadística y geografía*, 59-65.
- Magaña, V. (1999). *Los impactos del Niño en México*. México, D. F.: UNAM. 229.
- Magaña, V. (2012). *Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático*. México: INECC-PNUD.
- Makhelouf. (2009). The Effect of Green Spaces on Urban Climate and Pollution. *Iranian Journal of Environment, Health Science and Engineering*, 35-40.
- Mantua et al. (1997). A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1069-79.
- Martins, A. (2019). *BBC News Mundo*. Obtenido de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-48531389>
- Mc Gregor, et al. (2015). *Heat Waves and Health: guidance on warning-system development*. World Meteorological Organisation and World Health Organisation. Durham University. Obtenido de <https://dro.dur.ac.uk/28811/1/28811.pdf>
- Moreno, M. (1897). *Observaciones meteorológicas prácticas en el observatorio astronómico nacional de Tacubaya y en algunas otras estaciones mexicanas durante el año 1895, recopiladas y arregladas según el formulario internacional*. México, D. F.
- NCEP. (2005). *National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of commerce*. Obtenido de <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.narr.html>
- Neri, C. y V. Magaña. (2016). Estimation of Vulnerability and Risk to Meteorological Drought in Mexico. *Weather, climate and, society*, 8, 95-110. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-15-0005.1>.

- NOAA. (2005). *National Weather Service*. Department of Commerce, updated monthly. NCEP North American Regional Reanalysis (NARR) Research Data Archive at the Physical Sciences Laboratory, NOAA. Obtenido de <https://www.weather.gov/safety/heat-index>
- O'Brien, K. et al. (2008). *Disaster Risk Reduction, Climate Change Adaptation and Human Security: A Commissioned report for the Norwegian Ministry of Foreign Affairs*. Project, GECHS Report 2008:3
- Oke et al. (2017). *Urban Climates*. In *Urban Climates* (p.l). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Oke, T. R. (1988). The Urban Energy Balance. *Progress in Physical Geography*, 12, 471-508.
- OPS y OMS. (2019). *Olas de Calor y Salud*. Washington, D. C.: Organización Panamericana de Salud.
- PAOT. 2016). *PAOT*. Obtenido de Asentamientos Humanos Irregulares en el Suelo de Conservación: http://www.paot.org.mx/micrositios/FORO_CONS_RN/pdf/mesa_2/Emigdio_Roa.pdf
- Perkins y Alexander. (2013). On the Measurement of Heat Waves. *Journal of Climate*, 4500-4517.
- Pielke et al. (2002). The Influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *The Royal Society*, 1705-1719.
- Reyes et al. (1998). La Mortalidad por enfermedad diarreica en México: ¿Problema de acceso o de calidad de atención? *Salud Pública*, 316-323.
- Riojas et al. (2006). *Estudio Diagnóstico Sobre los Efectos del Cambio Climático en la Salud Humana de la Población en México*. Ciudad de México: INECC.
- Robine et al. (2008). Death toll exceed 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies*, 171-178.
- Sisto et al. (2016). Climate threats, water supply vulnerability and the risk of a water crisis in the Monterrey Metropolitan Area. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2-9.
- Steadman, R. G. (1979). 1979. *J. Appl. Meteor*, 861-873.
- Stewart y Oke. (Mayo de 2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1879-1900.

- Stewart y Oke. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1879-1900.
- Tan et al. (2010). The urban heat island and its impact on heta waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometereological*, 75-84.
- Tomas, F. (1996). Los asentamientos populares irregulares en las periferias urbanas de América Latina. *Centro de Estudios mexicanos y centroamericanos*, 17-43.
- Trenberth et al. (2003). The Changing Character of Precipitation. *Bulletin of the American MEteorological Society*, 1205-1218.
- Ubilla y Yohannessen. (2017). Contaminación Atmosférica Efectos en la Salud Respiratoria en el Niño. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 111-118.
- UNHABITAT. (2016). *Urbanization and Development. World Cities Report*. New York.: Naciones Unidas.
- UNISDR. (2004). *Living with Risk*. New York: United Nations.
- Vargas and Magaña. (2020). Warm spells and climate risk to human health in the Mexico City Metropolitan Area. *American Meteorological Society*, 351-365.
<https://doi.org/10.1175/WCAS-D-19-0096.1>
- Vargas y Magaña. (2020b). Climatic risk in the Mexico City Metropolitan Area due to Urbanization. *Urban Climate*. 33. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100644>
- Wilby, R. 2. (2006). *Past and projected trends in London´s urban heat island*. Londres, Reino Unido: Royal Meteorological Society. 251-260
- Zúñiga, E. y V. Magaña. (2018). Vulnerability and Risk to Intense Rainfall in Mexico: The Effect of Land Use Cover Change. *Investigaciones Geográficas*. 95.
<https://doi.org./10.14350/riq.59465>

7. Anexos

Warm Spells and Climate Risk to Human Health in the Mexico City Metropolitan Area

NURIA VARGAS

Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, Mexico

VÍCTOR MAGAÑA

Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, Mexico

(Manuscript received 18 July 2019, in final form 11

March 2020) ABSTRACT

During the second half of the twentieth century, rapid demographic growth and urban expansion led to the development of the Mexico City metropolitan area (MCMA) urban heat island (UHI). The thermal gradient between rural and urban regions is used to define the UHI in the transition zone along the 26°C isotherm of mean maximum temperature. As the MCMA expands, more natural vegetation is replaced with urbanization, and the spatial extent of the 26°C isotherm grows. The loss of natural vegetation, in a densely populated region of Mexico, leads to the formation of a canopy-layer UHI. The intensification of the MCMA UHI results in an increase in the frequency of daily maximum temperatures above 30°C (above 26°C on a weekly average), a threshold value that constitutes a natural hazard. Warm-spell occurrences are related to an increase in the number of acute diarrhea diseases (ADD), mainly in zones of the MCMA where the socioeconomic and environmental conditions are low (e.g., insufficient access to potable water). Vulnerable people are mostly located in new settlements along the periphery of the MCMA, where large numbers of hospital discharges due to ADD are reported. The combined effect of more frequent warm spells and increasing vulnerability results in higher levels of risk of suffering this type of health problem, mainly during the warmest part of the year. This analysis may serve to develop UHI mitigation strategies and early warning systems to manage high levels of ADD risk during warm spells.

Introduction

Climate-related disasters appear to be more frequent in recent decades due to climate change (IPCC 2012). Heat waves are more frequent and intense, contributing to heat mortality in both developed and developing countries (Organisation for Economic Co-operation and Development 2010). However, the idea of more frequent climate impacts on society only as a direct consequence of a positive trend in extreme (warmer) weather conditions frequently follows a naturalistic paradigm (O'Keefe et al. 1976). The vulnerability context in which weather extremes occur has also become an important part of the analysis of climatic risk (Cardona et al. 2012) and a key element to explain the impacts of adverse climate conditions.

One of the best examples on climatic hazards and vulnerability, leading to high levels of risk that affect

urban societies, are megacities (Wolf 2014; Mayrhuber et al. 2018). The well-known urban heat island (UHI) effect, related to increased mean temperatures, may also result in more intense and frequent heat waves (e.g., Zhang et al. 2018). Nevertheless, cities around the world continue their expansion, modifying their climate and increasing people's vulnerability and generating higher climate risk levels (e.g., De Sherbinin et al. 2007; Baker 2012). Estimating changes in the levels of risk is an important problem in the climate change agenda (IPCC 2012). However, there is no universally accepted methodology to evaluate vulnerability to climate change. Various approaches to project the potential impacts of climate change have been developed, but only a few are validated by actually comparing risk and impacts in space and time for recent decades (e.g., Neri and Magaña 2016).

The UHI appears as natural vegetation and surface water bodies are replaced with urban infrastructure (Oke et al. 2017). During the second half of the twentieth century, various cities rapidly grew with a significant loss

Corresponding author: Víctor Magaña, victormr@unam.mx

DOI: 10.1175/WCAS-D-19-0096.1

© 2020 American Meteorological Society. For information regarding reuse of this content and general copyright information, consult the [AMS Copyright Policy](http://www.ametsoc.org/PUBSReuseLicenses) (www.ametsoc.org/PUBSReuseLicenses).

of vegetation and a reduction in the associated ecosystem services, such as those of climate regulation (World Bank 2009). An analysis of climate change impacts in urban environments requires considering how the UHI develops and how such urbanization may result in more exposure and vulnerability. It is highly probable that more climate-related disasters in megacities occur due to increased exposure and vulnerability in regions where frequent extreme weather and climatic conditions occur.

Natural hazards are generally characterized and quantified in terms of measured data. For instance, heat waves in megacities have been described in terms of maximum temperature using station or satellite weather data (e.g., Jedlovec et al. 2017). However, human vulnerability to extreme weather conditions is more difficult to quantify. Assessing climate vulnerability begins by posing three basic questions (Neri and Magaña 2016): 1) Who is vulnerable [object of study: people of the Mexico City metropolitan area (MCMA)]? 2) To what are they vulnerable (natural hazard: warm spells)? 3) Why are they vulnerable (vulnerability factors: socioeconomic conditions, access to health and basic services, environmental conditions)? Various analyses suggest that vulnerability to warm spells depends on socioeconomic factors such as age, low standards of living, limited access to health services, or diminished ecosystemic services (Rey et al. 2009; Tan 2008). In recent years, more studies focus in determining the factors that make people vulnerable to heat waves in cities (e.g., He et al. 2019). In particular, the mortality related to heat waves has been analyzed for Latin American cities because of the need to develop prevention strategies in the health sector (Bell et al. 2008).

Heat waves may have negative effects on the health of vulnerable people (Kovats and Hajat 2008), but until recently most studies have mainly focused on heat strokes and the combined effect of heat waves and air pollution (Scortichini et al. 2018). However, warm-spell conditions on vulnerable people may also result in other types of health problems, such as acute diarrhea diseases (ADD) (e.g., Checkley et al. 2000). In recent decades, ADD rates in Mexico have diminished, but they still remain an important health problem, particularly among children under 5 years old (Riojas Rodríguez et al. 2006).

The development of the UHI in the MCMA has been documented by a number of authors (e.g., Jáuregui 2000; Cui and de Foy 2012). During the twentieth century, the temperature of the MCMA increased between 28 and 38°C (Jáuregui 2009). Heat waves, defined as three or more consecutive days with maximum temperature above 30°C, are more frequent. Warm spells, related to weekly averaged maximum temperatures above 26°C, are considered a natural hazard in Mexico City. In recent years in the

MCMA UHI, there are on the order of 10–20 warm spells per decade, whereas a century ago there used to be fewer than 3 per decade (Jáuregui 2009). These events occur mainly between March and May under low relative humidity conditions ($< 20\%$). To adapt to climate change, the change in climate risk and the factors that induce such changes should be documented.

Managing more intense warm spells in the MCMA UHI is becoming a challenge for public health agencies, particularly in the new poor developments on the periphery of the metropolitan area. Public policies and prevention measures aimed at reducing climatic risk require a better understanding of the ways in which enhanced heat waves affect vulnerable people. Therefore, the main objective of the present study is to document the climatic risks on human health generated by more intense warm spells in the UHI of the MCMA, mainly during the spring season.

Data and method

The method to relate urban development to health problems is based on the construction of risk estimates that explain how a natural hazard (e.g., warm spells) in a vulnerable context results in climate risks and climate-related impacts (e.g., Neri and Magaña 2016). This approach involves characterizing natural hazards based on observed data and quantifying vulnerability by means of indicators of the physical, environmental, and socioeconomic context. Warm spells are documented using maximum temperature daily recorded by the meteorological surface weather stations in the MCMA and surrounding region (Servicio Meteorológico Nacional 2018) for the 1950–2015 period. The number of stations in the domain of interest has varied in time from around 50 at the beginning of the 1950s to almost 200 in the late 1980s, and around 150 in recent years (Fig. 1).

Gridded daily fields of maximum temperature were constructed for the 1 January 1950 to 31 December 2015 period using a successive corrections scheme (Cressman 1959; Magaña et al. 2013). For this purpose, first-guess daily fields of maximum temperature were obtained from the North American Regional Reanalysis (NARR) project (Mesinger et al. 2006), with a spatial resolution of 32 km \times 32 km, that were linearly interpolated to 4 km \times 4 km grids. The higher-spatial-resolution NARR estimates of maximum temperature were further modified using a standard moist adiabatic lapse rate ($6.58^\circ\text{C km}^{-1}$) to correct for the effect of temperature change with height. The objectively analyzed maximum temperature fields were validated by comparing time series of station data with values at nearby grid points. The objectively analyzed maximum temperature fields correlate well with station data nearby ($r = 0.8$) (not shown).

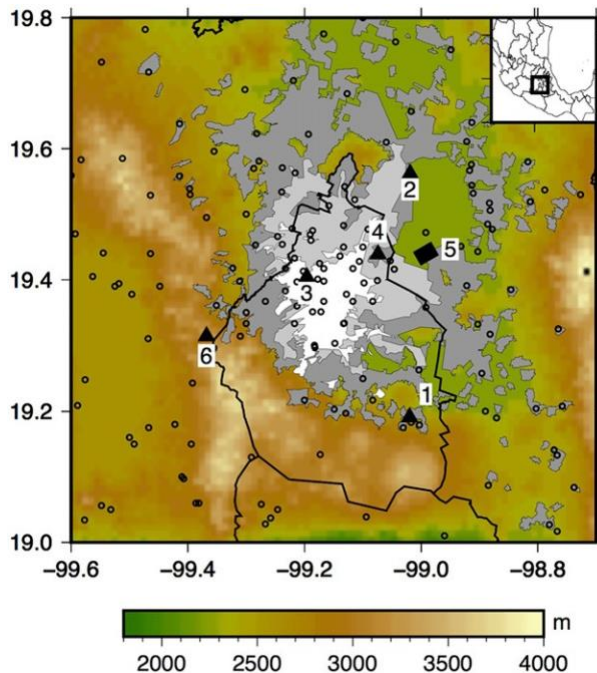


FIG. 1. Urban extension of the MCMA for the years 1950 (white), 1980 (light gray), and 2005 (dark gray). The circles correspond to surface weather stations in the domain. The numbers correspond to the locations of surface weather stations: 1) Milpa Alta, 2) Ecatepec, 3) Tacubaya, 4) Airport, 5) Texcoco, and 6) La Marquesa. The color shades correspond to the height (m) of the topography.

Defining the UHI in the MCMA requires determining the temperature contrasts between the rural and urban regions. The MCMA is located in the lower part of the valley of Mexico, surrounded by mountains (Fig. 1). The temperature decreases with height, resulting in a natural large thermal gradient between the lower and higher parts. But the MCMA UHI has formed mainly in relation to land-use changes, from natural vegetation to urban infrastructure. Therefore, the UHI may be defined as a canopy-layer UHI (Oke et al. 2017), where deforestation and urbanization enhance the local warming and the thermal contrasts between urban and rural regions. Most of the MCMA is in a region where large population density and low vegetation levels coexist. The MCMA may be identified using information on vegetation and population density. Population density data were obtained for the years 2000 and 2010 from the Socioeconomic Data and Applications Center (2018).

The spatial growth of the MCMA approximately coincides with negative changes in the vegetation levels and increases in population density. The level of vegetation in the domain of interest was described using the enhanced vegetation index (EVI), which serves to estimate biomass and monitor vegetation through a decoupling of the canopy

background signal and a reduction in atmosphere influences (Huete et al. 2002). EVI ranges between 20.2 and 1. For the MCMA, it was found that values between 0 and 0.2 approximately correspond to highly urbanized zones. When EVI and population density data are combined into a single index, the largest values are encompassed by the political boundary of the MCMA.

Daily maximum temperatures above 30°C are considered to be a natural hazard that may affect people's health (Harlan et al. 2006). Weekly reports of ADD cases are provided by the Health Agencies of Mexico [Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) 2018]. Anomalously large weekly maximum temperatures (above 26°C) were defined as warm spells or heat waves over the region (Jáuregui 2009). Information on ADD and warm spells was compared for the 2000 and 2011 period to establish a relationship between climate risk and impact. In the MCMA, the maximum temperatures are seldom above 30°C, and the effects of heat waves on the population are rarely related to heat stroke (Jáuregui 2009). As empirically determined by health agencies, heat waves appear to be associated with ADD [COFEPRIS 2018; Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) 2015] mainly among children under 5 years old, which is considered a highly vulnerable group. However, the assessment of climate vulnerability requires conceptualizing various factors that make people or socioecosystems susceptible of suffering harm under hazardous conditions (United Nations International Strategy for Disaster Reduction 2009). In addition to age, poverty constitutes a vulnerability factor to heat waves, since the possibilities of building an environment of thermal comfort are meager (e.g., air conditioning systems) (e.g., Reid et al. 2009).

The use of socioeconomic indicators, obtained during the official census in Mexico for 2000 and 2010 [Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) 2018], allows a characterization of the vulnerability of people to heat waves. For instance, their vulnerability may depend on whether they have access to basic medical services (Reyes et al. 1998) or education to know self-risk management strategies (e.g., Cid Ortiz et al. 2012). Overcrowding in neighborhoods, poor water quality for human use and consumption, inadequate disposal of excreta, and bad hygienic conditions of housing and public spaces have also been considered important vulnerability factors that may induce ADD. Socioeconomic data from INEGI (2018) have been used as proxies for the construction of vulnerability indicators on access to potable water, health services, population density, access to domestic services (such as refrigerators), and literacy level. In addition, the natural vegetation level (EVI) in the surroundings has been used and averaged

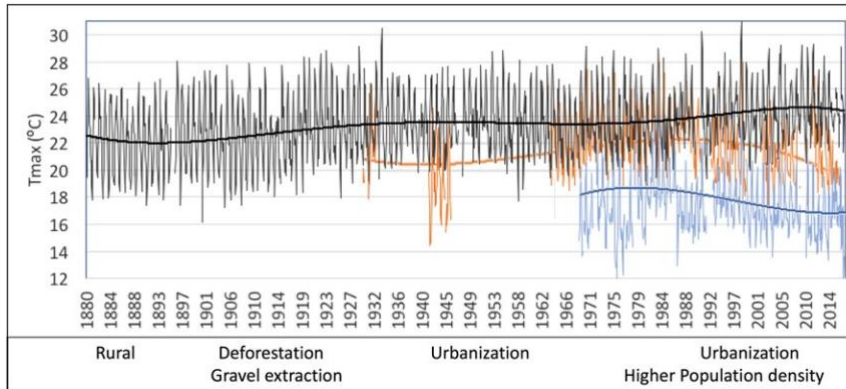


FIG. 2. Time series of mean monthly observed maximum temperature at the Tacubaya station (1878–2016) (thin black line), at the Milpa Alta station (1929–2016) (thin orange line), and at the La Marquesa station (1929–2016) (thin blue line). The thick solid lines correspond to a smoothed version (the very low frequency variations) of the observed maximum temperature at each station. Periods of important land use changes in the Tacubaya region are indicated at the bottom.

with the socioeconomic indicators to obtain a normalized vulnerability index to warm spells. After a number of tests and discussion with experts, it was decided that the level of access to potable water has a larger importance than the other factors, and therefore it has been given a larger (5 times) weight in the vulnerability index.

A preliminary climate risk estimate is obtained from the product of the natural hazard (the 90th percentile of daily maximum temperature) times the corresponding vulnerability. Risk estimates should approximately explain the temporal and spatial characteristics of ADD cases at the municipal level. If the risk model is adequate, the vulnerability factors are considered to be correct, and risk management strategies should focus on them. In the case of the UHI climatic risk, some actions have also been proposed to reduce the magnitude of the natural hazards, for instance, by means of reforestation (e.g., Wang and Akbari 2016).

The Federal Commission for Health Risk Management (COFEPRIS 2018) reports cases of hospital discharges of people who have been directly or indirectly affected by diarrhea disease. Weekly reports on children between 0 and 5 and 5 and 14 years old affected by ADD are used as a measure of the warm spells' impact. This information is compared with climate risk estimates for the MCMA.

Results

The evolution of the MCMA UHI

The maximum temperatures in the MCMA have significantly increased during the twentieth and twenty-first centuries. In the western part of the city, for instance, around the Tacubaya station (Fig. 1), there has been an increase in the mean annual maximum temperature from

around 22°C at the end of the nineteenth century to approximately 25°C in recent years (Fig. 2). The incremental transitions in maximum temperature occur by stages, as land-use changes take place, from natural vegetation to dense urbanization. In this process, at the end of the nineteenth century and the beginning of the twentieth century, the maximum temperature changed from 22 to 23°C, as deforestation and extraction of materials in the region took place. Between 1920 and 1965, the maximum temperature remained relatively stable until rapid urbanization occurred in the 1970s, resulting in a new temperature regime between 24 and 25°C. The maximum temperature has remained relatively stable since then. This warming process in the western part of the MCMA shows that the climate forcing related to land-use changes (e.g., deforestation–urbanization) has had important effects on the local climate (Oke et al. 2017). A similar pattern of loss of natural vegetation and increases in the mean maximum temperature has been observed over most of the MCMA. In rural regions nearby Tacubaya, as in La Marquesa or Milpa Alta (Fig. 1), the increase in maximum temperature in recent decades has been relatively small [$\sim 1^{\circ}\text{C}$ (50 yr) $^{-2}$] given that these regions tend to maintain their natural vegetation. This contrast implies that the urbanization and loss of natural vegetation have created the MCMA UHI.

Maximum temperatures in the MCMA are usually higher between March and May (boreal spring), prior to the rainy season. The orographic gradients in the domain lead to lower surface temperatures in the southern and western parts of the region, over the mountain range. The extent of the urban area rapidly grew in recent decades, resulting in increments of the surface temperature. Spatially, the UHI approximately coincides with

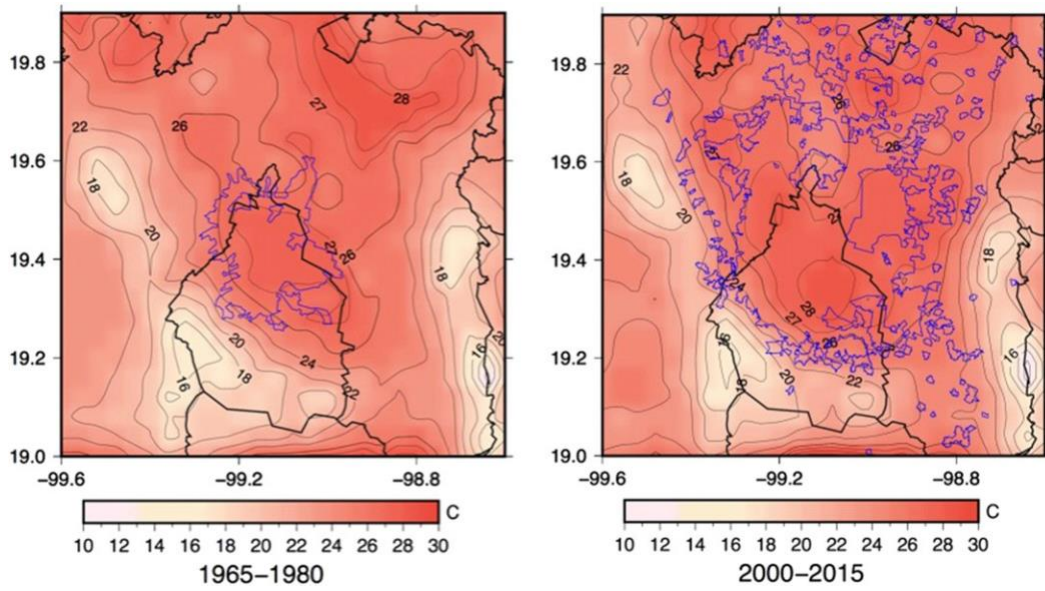


FIG. 3. Mean maximum temperatures ($^{\circ}\text{C}$) for March–May in the MCMA for the (left) 1965–80 and (right) 2000–15 periods. The thin blue line in the background denotes the extent of the urban area in 1980 and 2010.

the 26°C isotherm, which expands as the urban area enlarges (Fig. 3). For the 1965–80 period, most of the urbanization was located in the central part of the Mexico valley, where an average spring maximum temperature was around 27°C (Fig. 3, left panel). As the city grew, the UHI expanded and the 26°C isotherm covered a much larger area. In recent decades (2000–15), the urban area enlarged mainly to the northeastern and northwestern parts of the Mexico City valley and the UHI pattern is similar to the urban expansion of the MCMA (Fig. 3, right panel). In the eastern side of the MCMA, mean maximum temperatures have reached more than 28°C in the urban area, that is, a warming rate of more than 18°C in 30 years. In the central and northern parts of the MCMA, daily and even monthly maximum temperatures may be larger than 30°C , particularly in recent years, which turns into a natural hazard and leads to a climate risk for vulnerable people. The number of episodes of 30°C or more has increased in various parts of the MCMA. In the Tacubaya station, the number of heat waves changed from 2 or 3 per decade at the beginning of the twentieth century to more than 20 per decade at the end of the twentieth century (Jáuregui 2009).

The magnitude of temperature increases depends on the characteristics of the urbanization process (Oke et al. 2017). The level of conservation of the natural vegetation is an important element to modulate maximum temperature (Bolund and Hunhammar 1999). When changes in maximum temperature in two different landscapes of the MCMA are compared, the role of the natural vegetation may be estimated. For instance, in Ecatepec, a densely

populated region in the northeastern part of the MCMA, vegetation is sparse, and concrete, iron, and glass dominate the landscape. There, the increase in mean maximum temperature due to the UHI effect is almost 3.2°C in 30 years (Fig. 4, left panel). On the other hand, in Milpa Alta, a rural, less populated area in the southern part of the MCMA, natural vegetation and agricultural lands have been relatively conserved. There, a weaker increase (1°C) in mean maximum temperature in recent decades is observed (Fig. 4, right panel). The natural vegetation modulates mean temperature at the local and even regional level, providing an important ecosystem service of climate regulation. However, in Milpa Alta and Ecatepec, as in most of the MCMA, there has been an increase of around 5% in the frequency of events of 30°C , suggesting that warmer temperatures, as those related to warm spells, are related to the UHI intensification.

Loss of natural vegetation and maximum temperatures

The urban expansion in the MCMA in recent decades results in natural vegetation loss at a rapid pace. Developers prefer increasing the areas for buildings and houses over conserving, at least partially, natural vegetation. By means of the EVI, it is possible to distinguish the extension of urbanization and regions where vegetation has changed during the twentieth-first century. The EVI estimates can be associated with wooded areas (Hussein et al. 2017), which, for urban climate purposes, are important regions where evapotranspiration may mitigate UHI intensity (Ballinas and Barradas 2016). In the

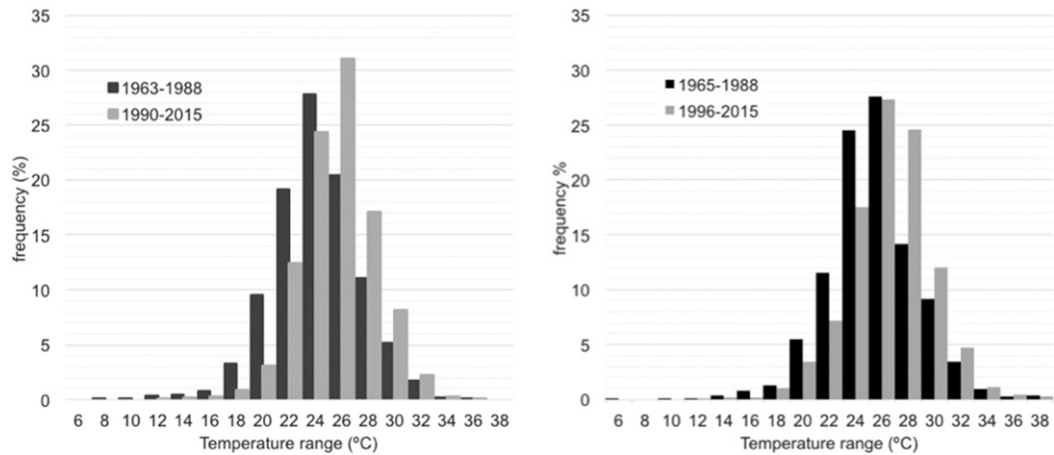


FIG. 4. Histograms of daily maximum temperature for (left) Ecatepec, between 1963 and 1988 (black bar) and between 1990 and 2015 (gray bar), and (right) Milpa Alta, for 1965–88 (black bar) and 1996–2015 (gray bar).

MCMA, EVI values of less than 0.1 nearly correspond to an absence of trees in highly urbanized areas (Fig. 5). The use of land-use and land-cover data over the MCMA (Buchhorn et al. 2019) indicates that most of natural vegetation has been changed for urban areas (not shown). It is empirically determined that for the MCMA case, the EVI contour of around 0.2 approximately corresponds to urban areas. In areas of larger mean September EVI values, natural vegetation appears to provide a climate-regulation service. When the EVI is compared for two periods, such as 2000–04 and 2011–15, the urban and less vegetated regions show an expansion, mainly to the northeastern and northwestern parts of the MCMA. In the eastern part of the domain, south of Nabor Carrillo Lake (Fig. 1), the sparse vegetation coincides with one of the most densely populated and low-income regions in the country. In the southern foothills of the domain, the forest area is gradually being occupied by new human settlements that are diminishing the extent of the natural vegetation, despite the existing conservation policies. Urban growth in the MCMA results in vegetation losses and warming since the energy balance is modified (Jáuregui 2009). In the recently urbanized areas, such land-use change has resulted in temperature increases between 18 and 28°C in 20 years (Jáuregui 2009). The largest warming in urbanized areas corresponds to the areas of asphalt, urban infrastructure, or bare soil.

EVI and population densities have changed from the 2000–04 period to the 2011–15 period, mainly on the periphery of the MCMA, toward the northeast and northwest (Fig. 6, left panel). In the central part of the MCMA, population density has slightly decreased. However, the vegetation loss continues over most of the region, inducing changes in the UHI. Maximum temperature changes between the two periods are large

in the eastern part of the MCMA (Fig. 6, right panel), where loss of vegetation and population density have changed significantly.

An additional factor that modulates maximum temperature in a large portion of the MCMA is heat advection. This term has been neglected in previous calculations of the drivers of the MCMA UHI (e.g., Ballinas and Barradas 2017). The effect of the afternoon mountain breeze in the southern and western part of the Mexico valley reduces the warming of the southern central parts of the UHI in the afternoon hours. Between 1400 and 1500 LT, the cool mountain–valley breeze blows to southern part of the MCMA (Fig. 7), advecting air of less than 25°C from the foothills toward the urban area. The cooling effect of this process may be as large as 3°C h⁻². The gradual loss of so-called natural vegetation conservation areas in the southern mountains may result in a weakening of the cool air advection process and an enhancement and expansion of the UHI. Therefore, the growth of the MCMA in recent decades has resulted in an enlarged and more intense UHI, with mean spring maximum temperatures close to 29°C in the central-eastern part of the urban area, that is, more than 2°C larger than three decades ago.

Extreme maximum temperature as a natural hazard

Increases in maximum temperature become a natural hazard when they represent a threat to human health and comfort. Warm spells are usually defined with respect to the local climatology of a region. Various definitions have been posed for warm spells, but in general, they are described as periods of unusually hot and dry or hot and humid weather that have a subtle onset and cessation and a duration of at least two to three days, and they

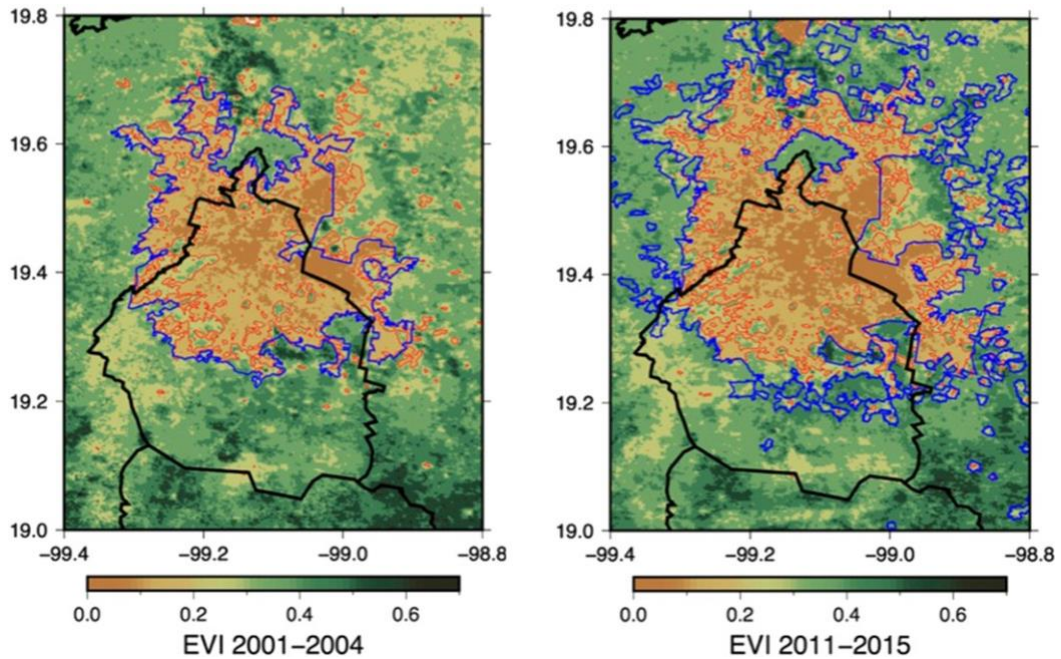


FIG. 5. Mean EVI for September in the MCMA for the: (left) 2000–04 and (right) 2011–15 periods. The thin blue line in the left and right panels corresponds to the limits of urbanization for 2000 and 2010, respectively. The red line denotes the logarithm of the population density (thousands of people per square kilometer).

usually have a discernible impact on human and natural systems (McGregor 2015). Maximum temperatures in the MCMA mostly occur during March, April and May, some of the driest months of the year, and are seldom above

30°C. The 90th percentile of maximum temperature shows the area potentially affected with extreme temperatures. During the 1965–80 period, a 10% chance of extreme maximum temperatures is usually above 28°C, over the

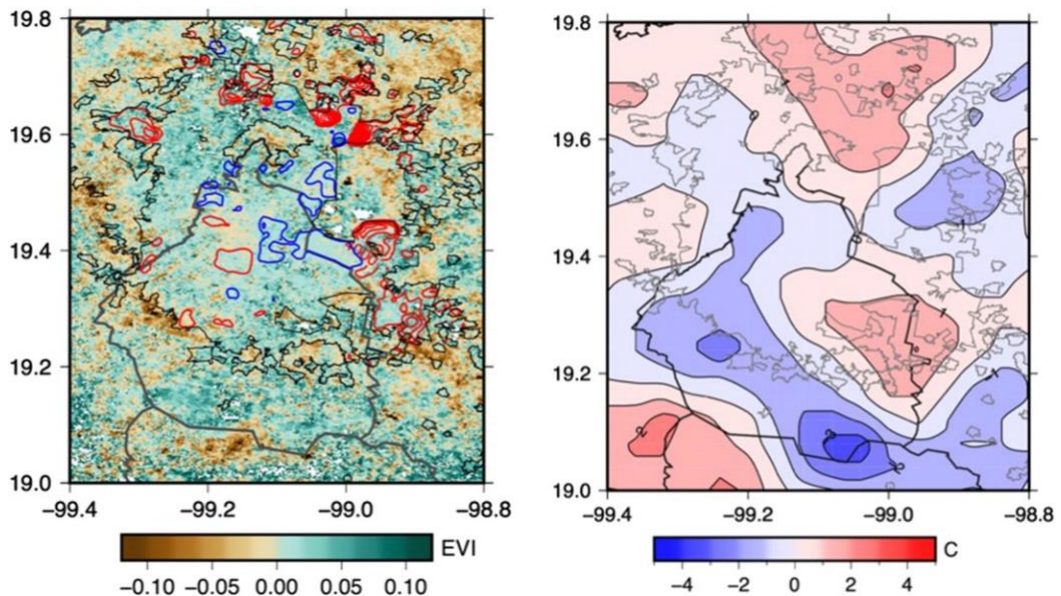


FIG. 6. (left) Change in mean September EVI between the average conditions of the 2000–04 period and the 2011–15 period. The population density (persons per square kilometer) changes between 2000 and 2015 are denoted with isolines, with red or blue lines indicating an increase or decrease in population density, respectively. (right) Change in mean March–May maximum temperature (δC) between the 2000–04 and 2011–15 periods.

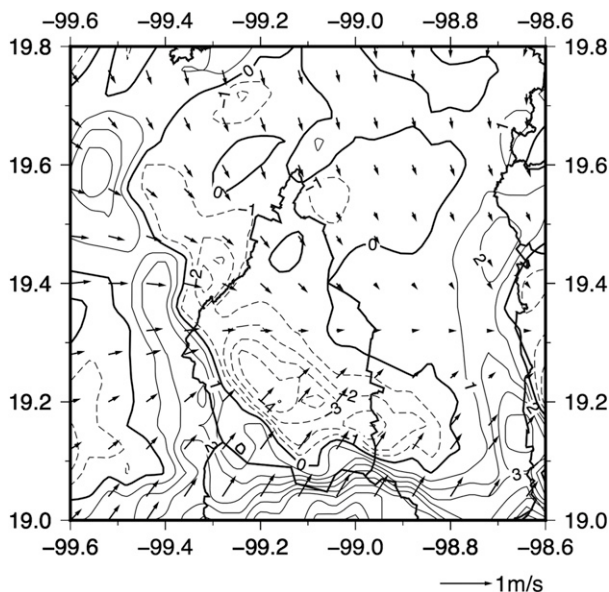


FIG. 7. Long term means of the 2100 UTC (1500 LT) April surface wind (vectors) and heat advection ($\delta C h^{-2}$; contours). Cooling in the southern part of the MCMA by heat advection is represented by dashed lines.

urbanized area of central Mexico City (Fig. 8, left panel). However, for the 2000–15 period, this area extended to northwest and northeast, as a result of urbanization (densely populated areas with little or no natural vegetation). The 90th percentile of daily maximum temperature is above 29 δ and 30 δ C over a large part of the UHI (Fig. 8, right panel). In central eastern Mexico

City, daily maximum temperatures over 34 δ and 35 δ C for two consecutive days have already been recorded in recent years. In areas that maintain part of their natural vegetation, changes in the 90th percentile of daily maximum temperatures are weaker than in regions where vegetation was lost, as in the newly urbanized regions. During El Niño years, chances of maximum temperatures above 33 δ C increase, as in the spring of 1998, when maximum temperatures for several consecutive days occurred in April (Magaña 1999). The number of days with maximum temperature above 30 δ C has increased by more than 10% in recent decades, which implies an increase in the frequency of warm spells (Jáuregui 2009).

The impacts of heat waves in the MCMA: Acute diarrhea diseases

In several regions of Mexico, the impacts of heat waves have been associated with heat stroke or other cardiovascular diseases. In Mexicali, in northern Mexico, maximum temperatures above 40 δ C are frequent (e.g., Jaramillo Ramírez et al. 2011) and result in large mortality rates (Díaz Caravantes et al. 2014). However, in the MCMA the maximum temperatures rarely reach values that may threaten human life in such manner. In recent years however, diarrheal disease cases in the northeastern part of the MCMA tend to occur more frequently during the warmest months of the year: March, April, or May (Fig. 9). This may be related to human consumption of food rotted by hot weather or to pollution associated with stronger winds, dust, and bacteria dispersion. In the MCMA, more than

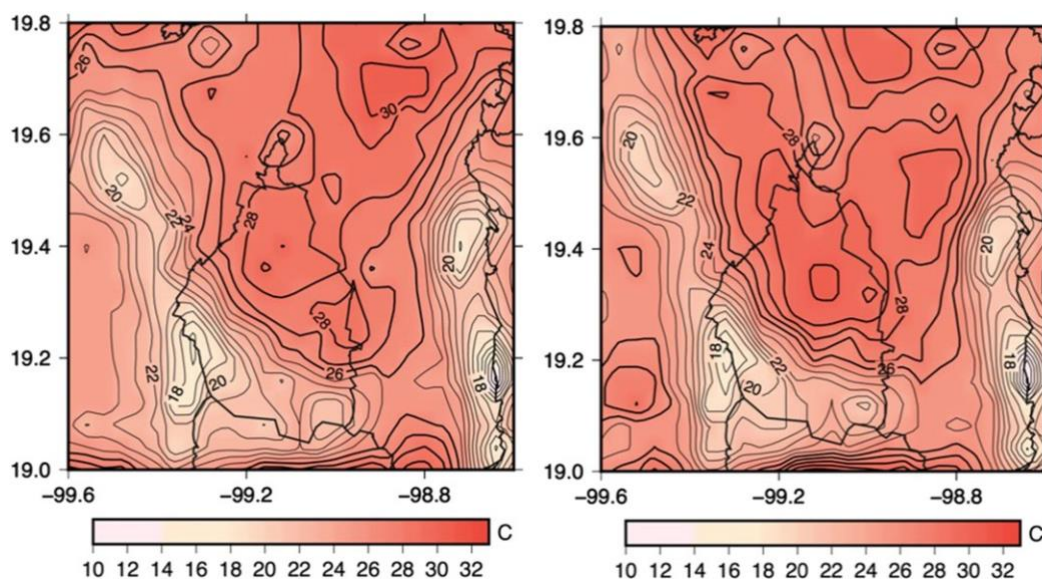


FIG. 8. Ninetieth percentile of daily maximum temperature, in the MCMA for the (left) 1965–80 and (right) 2000–15 periods.

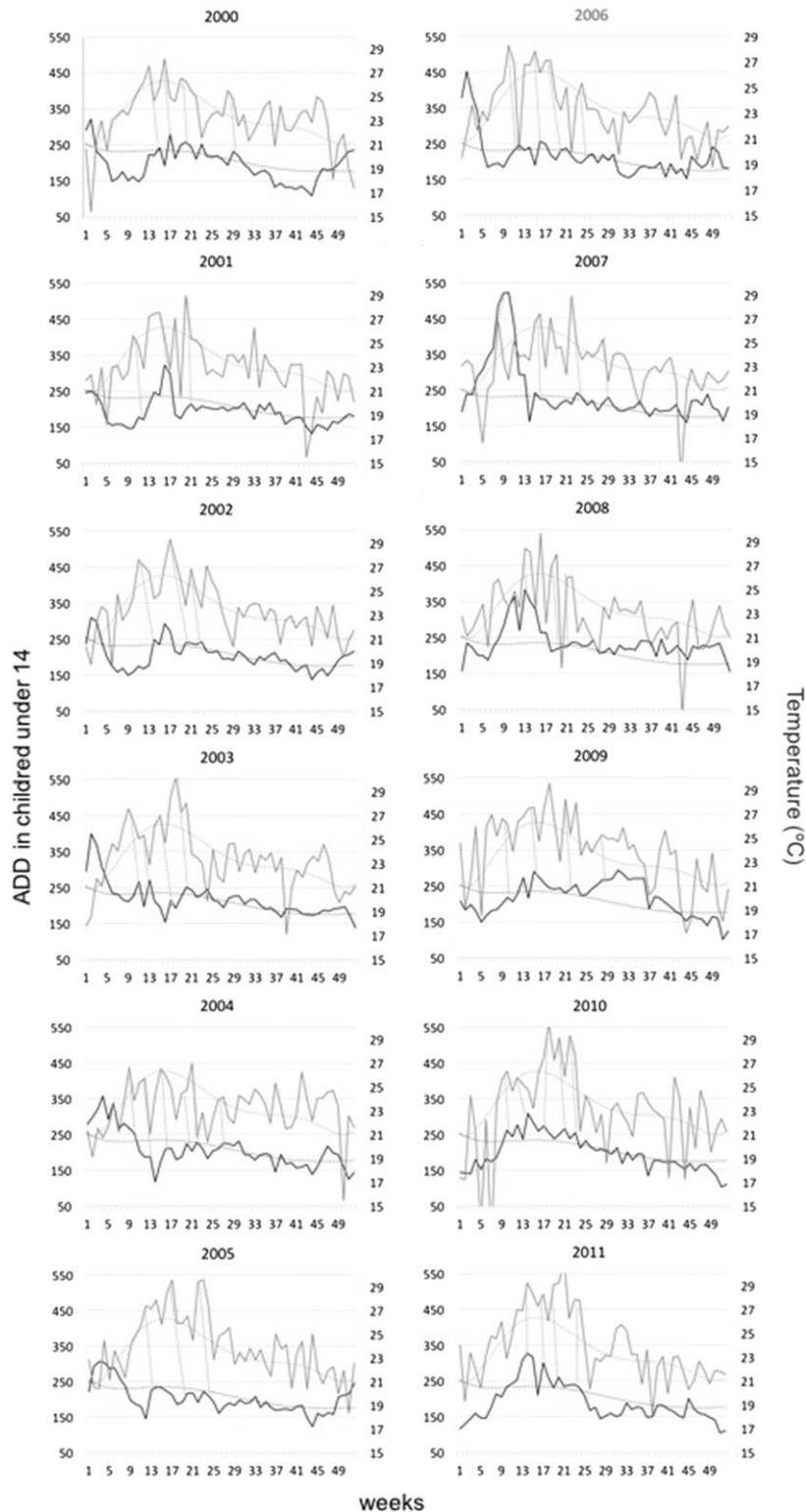


FIG. 9. Weekly number of hospital discharges for acute diarrhea diseases (ADD) for children between 0 and 14 years old in the MCMA (black line) and averaged weekly maximum temperatures over the MCMA (gray line). The smooth solid lines correspond to their weekly climatology. Dashed tilted lines show the correspondence between an increase in maximum temperatures and increases in the number of ADD.

90% of the population has access to water inside their houses. However, some people living in the eastern part of the city, or in municipalities near the central region, lack basic public services such as potable drinking water (INEGI 2018). The limited access to this service, particularly during the dry warm season, contributes to the lack of hygienic measures and the proliferation of ADD, mainly among children, particularly during heat-wave periods, when interruptions in the distribution of water are more frequent.

To determine the relationship between heat and ADD episodes, weekly maximum temperatures averaged over the MCMA and diarrhea reports among children between 0 and 14 years old are examined for the 2000–11 period (Fig. 9). The spatial average of weekly maximum temperature is used, considering that heat waves affect the entire domain. In most years of this period, weekly maximum temperatures above the average (climatology) appear to lead to increases in the number of ADD reports one or two weeks later, mostly during the spring months. The time difference is related to the process of acquiring the disease, going to the hospital, and being discharged. Data show that warm spells and ADD hospital discharge reports are usually larger between March and May. The Mexican Ministry of Health considers there is an expected number of cases every week, but the situation becomes anomalous when the number of ADD reports is above such expected value. In general, the intensity of the warm spell is not proportional to the increase in the number of ADD reports. However, warmer-than-normal weekly maximum temperatures are generally followed by an increase in the number of ADD cases in children.

The previous analysis shows that warm spells in the MCMA may affect people's health, but the magnitude of the impact does not only depend on the maximum temperature anomaly. The socioeconomic and environmental context is important to determine the regions of the MCMA, where warm spells may affect the most.

Vulnerability and risk under warm spells

A larger number of people exposed to warm spells increases the magnitude of the impacts. The MCMA population increased from around 5 million people in the 1950s, to around 20 million in 2010 (INEGI 2018). A large percentage of the population in Mexico has obesity and cardiovascular problems (DiBonaventura et al. 2018). These factors can make the population vulnerable to episodes of higher-than-average temperatures—for instance, above 30°C—that occur during warm spells in the highly urbanized zones of the MCMA. Some proposals

suggest that the vulnerability of people of the MCMA to extreme heat depends on six factors (among others): (i) access to basic domestic services (potable water), (ii) access to health services, (iii) population density (overcrowding in houses), (iv) degree of illiteracy (to be informed on climate risks), (v) degree of vegetation cover, and (vi) refrigerator availability. All of these indicators are dynamic (vary in time) and may be described in terms of official data. For instance, the largest increase in people's density takes place in new settlements, in the northeastern part of the MCMA. In the present vulnerability analysis, it was found that people are more vulnerable to heat waves and experience ADD when access to potable water is insufficient.

The normalized indicators are constructed using official census information from recent years: 2000 and 2010 (INEGI 2018), obtained with data at the municipal level and higher spatial resolution. The hazard data, corresponding to the 90th percentile of maximum temperature is combined with the vulnerability index to obtain ADD risk indices for 2000 and 2010. During 2000, the most vulnerable population was located mostly in the eastern part of the MCMA, that is, in the State of Mexico (Fig. 10, left panel). In 2010, the most vulnerable people were located in the new settlements, on the periphery of the domain of study, mainly in the northeastern part of the MCMA (Fig. 10, right panel), suggesting that new settlements delay in receiving basic urban services. Some of the most vulnerable places correspond to irregular settlements, with limited access to public health services and potable water. Their environment is usually degraded with little natural vegetation and high pollution levels (Makhelouf 2009). Low vulnerability in the old central part of the MCMA suggests that its population has reached a higher socioeconomic level and adequate urban services throughout the years.

The 90th percentile of maximum temperature is larger toward the eastern, northeastern, and northwestern zones of the MCMA. Climatic risk of ADD to warm spells, among children between 0 and 14 years old, has increased in recent years (Fig. 11). The areas of high levels of risk approximately correspond to the distribution of the zones with a large number of hospital discharge reports related to ADD among children, that is, in the northern and eastern parts of the urban area (Fig. 12). The largest number of ADD reports (at the municipal level) are also observed in the northeastern and northwestern parts of the MCMA, in approximate agreement with the high climatic risk index. There are differences in the exact location of the maximum number of ADD reports and risk estimates, since some people in the State of Mexico municipalities frequently move to the nearest hospitals in Mexico City

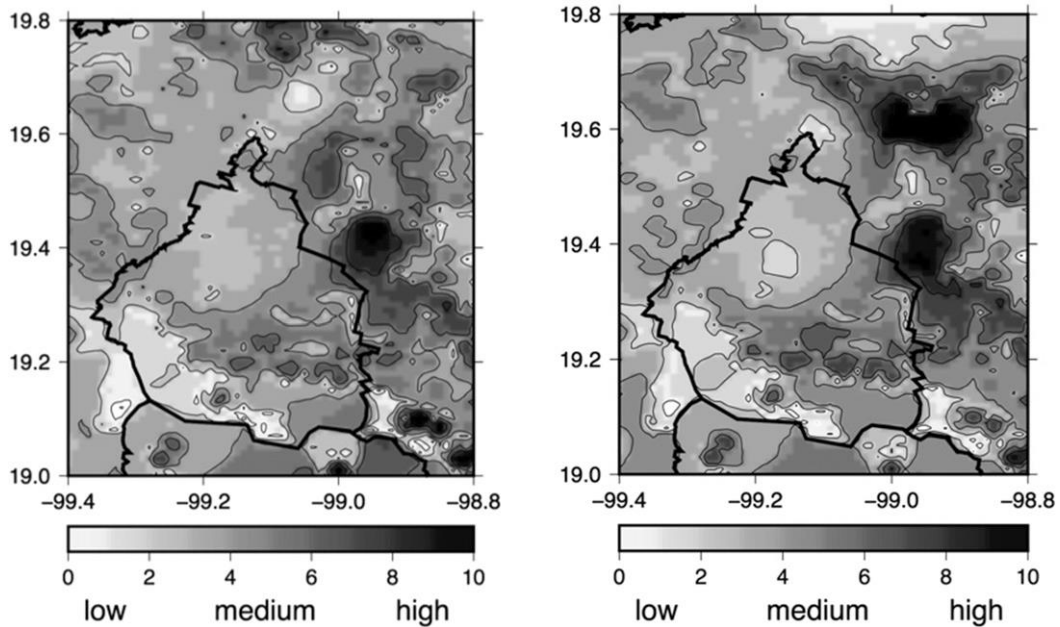


FIG. 10. Vulnerability index to extreme maximum temperature for heat waves for (left) 2000 and (b) 2010 in the MCMA. The scale bar is a reference to low and high values only.

area to be treated. Given that the data correspond to reports on the patients treated in hospitals, there could be a bias in the precise location of the report.

Therefore, it is high temperature but also the condition of vulnerability, that is, risk, that better explains the impacts of the temporal and spatial distribution of ADD. The limitation on the information about cases of diarrhea (place where the person acquired the disease) caused by extreme heat reduces the skill of the risk model to better define the location of the impacts. This is obviously part of the uncertainty of any risk model. Nevertheless, the importance of a risk approach to propose adequate adaptation measures to warm spells in the MCMA is now available to define a prevention strategy in the health sector.

Summary and conclusions

The urban expansion of the MCMA has resulted in an UHI that tends to increase the magnitude and frequency of warm spells. The environmental and socioeconomic conditions of this urban area create vulnerabilities to anomalously high maximum temperature. During the warm season, warm spells may result in increased risk of ADD outbreaks in the central eastern and northeastern parts of the MCMA, characterized as the most vulnerable zones. We conclude that an urban development that reduces or eliminates natural vegetation results in warmer temperatures and a

horizontal growth and intensification of the UHI. Most of the time it is irregular settlements on the periphery of the city, with low socioeconomic conditions and limited access to potable water, that provoke environmental degradation and make people more vulnerable to warm spells. This is common in the urban expansion of the MCMA, which exacerbates social vulnerability by increasing exposure, the loss of ecosystem services, and poor socioeconomic conditions. Children are particularly vulnerable to heat waves.

According to our study,

- (i) the expansion of the MCMA has resulted in an increase of maximum temperature (mean and extremes),
- (ii) the loss of natural vegetation in the urbanization process generates changes in temperature that, in combination with heat-wave activity, results in a natural hazard for people's health,
- (iii) vulnerability to heat waves and risk of ADD in the eastern and northern parts of the MCMA are mainly related to an enhanced UHI and socioeconomic conditions, and
- (iv) this analysis may serve to develop a heat-health early warning system for the MCMA.

Climate risk management is aimed at reducing, for instance, the negative impacts of warm spells. The estimates of climate risk based on probabilities of higher temperatures above a critical threshold should serve to design structural measures to manage risk,

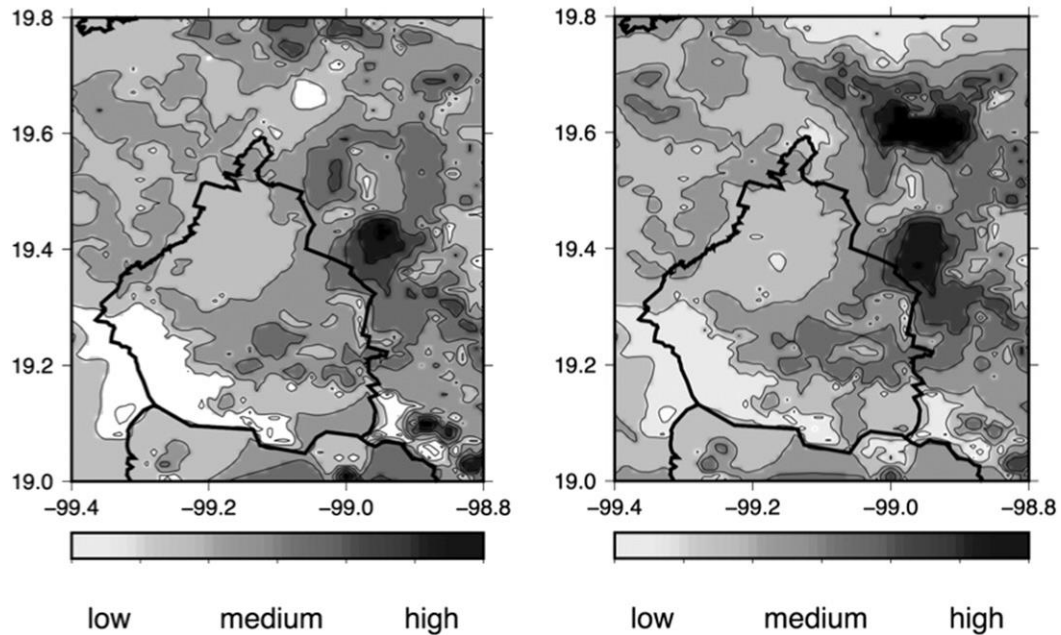


FIG. 11. Risk of ADD under warm spells in the MCMA for the (left) 2000–04 and (right) 2010–14 periods.

including mitigation of the UHI. On the other hand, when risk is calculated based on observed conditions for a particular day or week or on weather forecasts, a response to critical risk may be based on an early warning system. Our results indicate that an early warning to warm spells in the MCMA may be issued a week in advance, particularly for the most vulnerable regions. Improved weather forecasts and climate risk

information are important elements to face the increase in the frequency and magnitude of heat waves. Although the warm episodes occur over most of the MCMA, adaptation strategies should be implemented in the regions under high risk, as suggested by the [World Health Organization \(2015\)](#), and it could be implemented based on a risk approach, once an adequate communication strategy is developed.

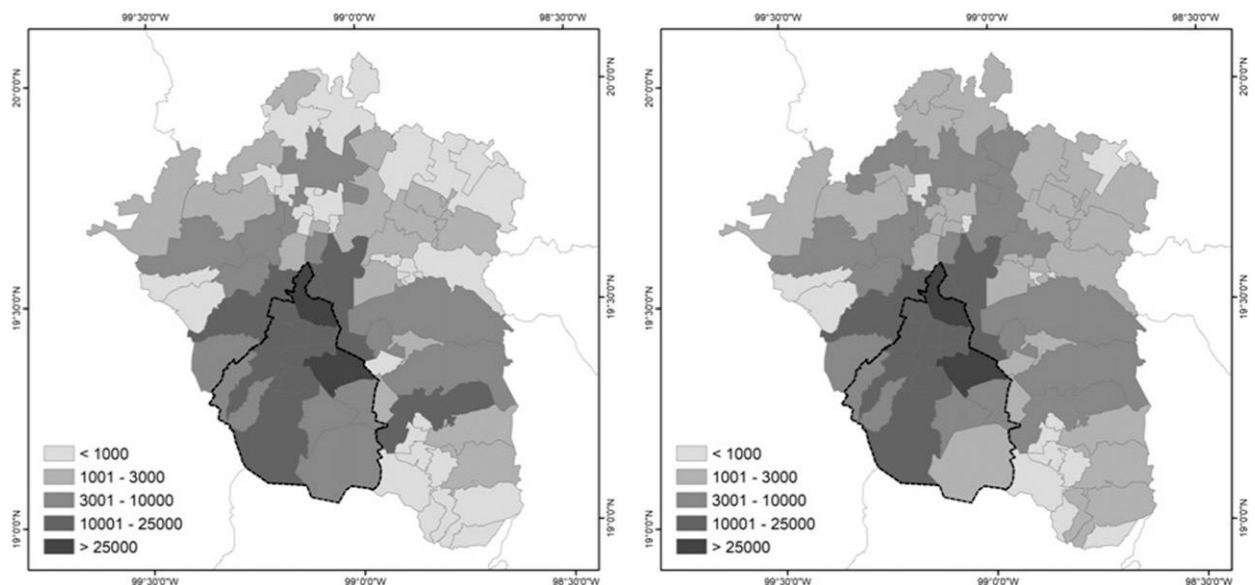


FIG. 12. Number of reports of hospital discharges after ADD for children between 0 and 14 years old at the municipal-level MCMA for March–June of (left) 2000–04 and (right) 2007–11 (data source: COFEPRIS).

Climate risk management also requires mitigation of warm spells by reducing the magnitude of the UHI, for instance, by means of urban reforestation in the eastern part of the MCMA. It also requires adaptation, which involves addressing the vulnerability factors, such as information to people on the conditions that favor ADD. Not all the socioeconomic conditions that result in vulnerability may be modified to reduce risk, but its quantification is necessary to determine when high levels of risk are reached.

Most medium-sized cities in Mexico follow an urban growth pattern similar to the one observed in the MCMA, in which the construction of infrastructure (buildings, roads, etc.) is more important than maintaining natural ecosystem services (conservation of trees and natural vegetation in general). An attribution exercise of the UHI may serve to determine where urban reforestation or other mitigation strategies may be implemented (e.g., recovery of rivers). Such studies would be of benefit to a society interested in climate risk management.

It is necessary that, in the near future, better information on the direct impacts of heat on people of the MCMA, such as heat stroke, be prepared. Adaptation to the UHI or climate change requires redefining the strategies for human settlements, mainly on the periphery of the urban area, by improving their access to better environmental and economic living conditions. The interest of the Mexican government in climate change should also address the problem of the UHI by establishing urban reforestation programs or improved public health services in vulnerable regions. Climate risk scenarios in megacities may serve to better plan land use in medium-sized cities experiencing rapid demographic growth.

Acknowledgments. We thank Gustavo Vazquez, who kindly helped with the preparation of meteorological data. Tania Pérez and Moises Lopez helped in processing satellite and socioeconomic data provided by LANOT-UNAM. We are indebted to Narda Vazquez for her kind assistance in preparing data from COFEPRIS. We thank three anonymous reviewers for valuable comments to the original version of the paper. Discussions with Rodolfo Acuña on the relationships between climate and health were extremely valuable. We also thank Guadalupe de la Luz Gonzalez for providing data on health at the municipal level. This project was financially supported with a grant from UNAM PAPIIT-112717. Nuria Vargas was financially supported with a CONACYT scholarship (371862). This paper also benefitted from several comments in the UNAM-Seminar on Socioenvironmental Risks (SURSA). The support of Conacyt-FORDECYT/12SE/2018/11/29-05 is also appreciated.

REFERENC ES

- Baker, J. L., 2012: *Climate Change, Disaster Risk and the Urban Poor: Cities Building Resilience for a Changing World*. World Bank Publications, 316 pp.
- Ballinas, M., and V. Barradas, 2016: The urban tree as a tool to mitigate the urban heat island in Mexico City: A simple phenomenological model. *J. Environ. Qual.*, 45, 157–166, <https://doi.org/10.2134/JEQ2015.01.0056>.
- Bell, M. L., M. S. O'Neill, N. Ranjit, V. H. Borja-Aburto, L. A. Cifuentes, and N. C. Gouveia, 2008: Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: A case-crossover study in São Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico. *Int. J. Epidemiol.*, 37, 796–804, <https://doi.org/10.1093/ije/dyn094>.
- Bolund, P., and S. Hunhammar, 1999: Ecosystem services in urban areas. *Ecol. Econ.*, 29, 293–301, [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00013-0).
- Buchhorn, M., B. Smets, L. Bertels, M. Lesiv, N.-E. Tsendbazar, M. Herold, and S. Fritz, 2019: Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: Epoch 2015: Globe. Copernicus Land Monitoring Service, accessed 11 February 2020, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3243509>.
- Cardona, O. D., and Coauthors, 2012: Determinants of risk: Exposure and vulnerability. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, C. B. Field et al., Eds., Cambridge University Press, 65–108.
- Checkley, W., L. Epstein, and R. Gilman, 2000: Effects of El Niño and ambient temperature on hospital admissions for diarrhoeal diseases in Peruvian children. *Lancet*, 355, 442–450, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)82010-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)82010-3).
- Cid Ortiz, G., C. Castro Correa, and V. Rugiero De Souza, 2012: Percepción del riesgo en relación con capacidades de auto-protección y autogestión, como elementos relevantes en la reducción de la vulnerabilidad en la ciudad de La Serena (Perception of risk in relation to self-protection and self-management capacities, as relevant elements in reducing vulnerability in the city of La Serena). *Rev. INVI*, 27, 105–142, <https://doi.org/10.4067/S0718-83582012000200004>.
- COFEPRIS, 2018: Bases de datos sobre egresos hospitalarios (Databases of hospital discharges), 17 January 2019. <https://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/historico-boletin-epidemiologico>.
- CONAGUA, 2015: Agua, salud y medio ambiente (Water, health, and environment). In *Estadísticas del Agua en México: edición 2015* (Statistics of water in Mexico: 2015 edition), Gobierno de México Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Comisión Nacional del Agua Rep., 179–181, accessed 12 May 2018, <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2015.pdf>.
- Cui, Y. Y., and B. de Foy, 2012: Seasonal variations of the urban heat island at the surface and the near-surface and reductions due to urban vegetation in Mexico City. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 51, 855–868, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0104.1>.
- Cressman, G. P., 1959: An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 87, 367–374, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1959\)087<0367:AOOAS.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1959)087<0367:AOOAS.2.0.CO;2).
- De Sherbinin, A., A. Schiller and A. Pulsipher, 2007: The vulnerability of global cities to climate hazards. *Environ. Urbanization*, 19, 39–64, <https://doi.org/10.1177/0956247807076725>.
- Díaz Caravantes, R. E., A. L. Castro Luque, and P. Aranda Gallegos, 2014: Mortalidad por calor natural excesivo en el noroeste de México: Condicionantes sociales asociados a esta causa de muerte (Mortality from excessive natural heat in

- northwestern Mexico: Social determinants associated with this cause of death). *Frontera Norte*, 26, 155–177.
- DiBonaventura M., H. Meincke, A. Le Lay, J. Fournier, E. Bakker and A. Ehrenreich, 2018: Obesity in Mexico: Prevalence, comorbidities, associations with patient outcomes, and treatment experiences. *Diabetes, Metab. Syndr. Obes.: Targets Ther.*, 11, 1–10, <https://doi.org/10.2147/dmso.s129247>.
- Harlan, S., A. Brazel, L. Prashad, L. Stefanov, and L. Larsen, 2006: Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. *Soc. Sci. Med.*, 63, 2847–2863, <https://doi.org/10.1016/J.SOCSCIMED.2006.07.030>.
- He, C., L. Ma, L. Zhou, D. K. Hai, Y. Zhang, C. M. Wei, and B. Chen, 2019: Exploring the mechanisms of heat wave vulnerability at the urban scale based on the application of big data and artificial societies. *Environ. Int.*, 127, 573–583, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.057>.
- Huete, A., K. Didan, T. Miura, E. P. Rodriguez, X. Gao, and L. G. Ferreira, 2002: Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.*, 83, 195–213, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
- Hussein, S., F. Kóvacs, and Z. Tobak, 2017: Spatiotemporal assessment of vegetation indices and land cover for Erbil City and its surrounding using MODIS imageries. *J. Environ. Geogr.*, 10, 31–39, <https://doi.org/10.1515/JENGEO-2017-0004>.
- INEGI, 2018: Censos de población y vivienda 2000 y 2010 (Population and housing censuses 2000 and 2010). Accessed 15 March 2019, https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/default.html#Datos_abiertos.
- IPCC, 2012: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press, 582 pp., <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>.
- Jaramillo Ramírez, H. J., G. López Cota, and M. Rodríguez Lomelí, 2011: Golpe de calor: Un problema de salud pública en Mexicali. *Salud Pública de México*, 53, 285–286, <https://doi.org/10.1590/s0036-36342011000400001>.
- Jáuregui, E., 2000: Breve descripción del clima de la Cuenca de México (Brief description of the Mexico Basin climate). *El Clima de la Ciudad de México (The Climate of Mexico City)*, Temas Selectos de Geografía de México, Plaza y Valdés, 31–43.
- , 2009: The heat spells of Mexico City. *Invest. Geogr.*, 70, 71–76, https://pdfs.semanticscholar.org/ad73/9a6c7bac37154d9b99d5fa514cfa06db7c01.pdf?_ga=2.46396709.305979132.1586110582-601156690.1586110582.
- Jedlovec, G., D. Crane, and D. Quattrochi, 2017: Urban heat wave hazard and risk assessment. *Results Phys.*, 7, 4294–4295, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.10.056>.
- Kovats, R. S., and S. Hajat, 2008: Heat stress and public health: A critical review. *Annu. Rev. Public Health*, 29, 41–55, <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843>.
- Magaña, V., 1999: *Los Impactos de El Niño en México (The Impacts of El Niño in Mexico)*. UNAM, 229 pp., <http://centro.paot.org.mx/index.php/porinstituciones/otros-organismos/73-varios/745-los-impactos-de-el-nino-en-mexico>.
- , L. C. López, and G. Vázquez, 2013: El pronóstico de lluvias intensas para La Ciudad de México (Forecasting heavy rain for Mexico City). *TIP Rev. Espec. Cienc. Quim.-Biol.*, 16, 18–25, [https://doi.org/10.1016/S1405-888X\(13\)72074-6](https://doi.org/10.1016/S1405-888X(13)72074-6).
- Makhelouf, A., 2009: The effect of green spaces on urban climate and pollution. *Iran. J. Environ. Health Sci. Eng.*, 6, 35–40.
- Mayrhuber, E. A. S., and Coauthors, 2018: Vulnerability to heat-waves and implications for public health interventions—A scoping review. *Environ. Res.*, 166, 42–54, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.05.021>.
- McGregor, G. R., 2015: *Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development*. World Meteorological Organization, 96 pp. Mesinger, F., and Coauthors, 2006: North American Regional Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87, 343–360, <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-3-343>.
- Neri, C., and V. Magaña, 2016: Estimation of vulnerability and risk to meteorological drought in Mexico. *Wea. Climate Soc.*, 8, 95–110, <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-15-0005.1>.
- Oke, T., G. Mills, A. Christen, and J. Voogt, 2017: *Urban Climates*. Cambridge University Press, 546 pp., <https://doi.org/10.1017/9781139016476>.
- O’Keefe, P., K. Westgate, and B. Wisner, 1976: Taking the naturalness out of natural disasters. *Nature*, 260, 566–567, <https://doi.org/10.1038/260566a0>.
- Organisation for Economic Co-operation and Development, 2010: *Cities and Climate Change*. OECD Publishing, 276 pp., <https://doi.org/10.1787/9789264091375-en>.
- Reid, C. E., M. S. O’Neill, C. J. Gronlund, S. J. Brines, D. G. Brown, A. V. Diez-Roux, and J. Schwartz, 2009: Mapping community determinants of heat vulnerability. *Environ. Health Perspect.*, 117, 1730–1736, <https://doi.org/10.1289/ehp.0900683>.
- Rey, G., A. Fouillet, P. Bessemoulin, P. Frayssinet, A. Dufour, E. Jouglu, and D. Hémon, 2009: Heat exposure and socio-economic vulnerability as synergistic factors in heat-wave-related mortality. *Eur. J. Epidemiol.*, 24, 495–502, <https://doi.org/10.1007/s10654-009-9374-3>.
- Reyes, H., P. Tomé, G. Gutiérrez, L. Rodríguez, M. Orozco, and H. Guiscafré, 1998: La mortalidad por enfermedad diarreica en México: ¿Problema de acceso o de calidad de atención? (Diarrheal disease mortality in Mexico: A problem of access or of quality of care?) *Salud Pública Mex.*, 40, 316–323, <https://doi.org/10.1590/S0036-36341998000400003>.
- Riojas Rodríguez, H., M. Hurtado Diáz, J. Idrovo Velandia, and H. Valzquez Grameix, 2006: Estudio diagnóstico sobre los efectos del cambio climático en la salud humana de la población en México: Informe final (Diagnostic study on the effects of climate change on the human health of the population of Mexico: Final report). Instituto Nacional de Ecología Instituto Nacional de Salud Pública, 33 pp., <http://www2.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/e2006h.pdf>.
- Scortichini, M., M. De Sario, F. K. De’Donato, M. Davoli, P. Michelozzi, and M. Stafoggia, 2018: Short-term effects of heat on mortality and effect modification by air pollution in 25 Italian cities. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 15, 1771, <https://doi.org/10.3390/ijerph15081771>.
- Socioeconomic Data and Applications Center, 2018: Gridded Population of the World, version 3 (GPWv3): Population density grid, V. 3.00. Center for International Earth Science Information Network, Columbia University, and Centro Internacional de Agricultura Tropical, NASA Socioeconomic Data and Applications Center, accessed 8 April 2019, <https://doi.org/10.7927/H4XK8CG2>.
- Servicio Meteorológico Nacional, 2018: Mexico National Weather Service Data Base. Government of Mexico, accessed 13 July 2018, <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>.
- Tan, J., 2008: Commentary: People’s vulnerability to heat wave. *Int. J. Epidemiol.*, 37, 318–320, <https://doi.org/10.1093/ije/dyn023>.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 2009: Terminology on disaster risk reduction. United Nations

Office for Disaster Risk Reduction Doc., 30 pp., https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf.

Wang, Y., and H. Akbari, 2016: The effects of street treeplanting on urban heat island mitigation in Montreal. *Sustainable Cities Soc.*, 27, 122–128, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.013>.

Wolf, T., 2014: Performance assessment of a heat wave vulnerability index for Greater London, United Kingdom. *Wea. Climate Soc.*, 6, 32–46, <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-13-00014.1>.

World Bank, 2009: Convenient solutions to an inconvenient truth: Ecosystem-based approaches to climate change. World Bank

Publications, 128 pp., <http://documents.worldbank.org/curated/en/745791468150298239/Convenient-solutions-to-an-inconvenient-truth-ecosystem-based-approaches-to-climate-change>.

World Health Organization, 2015: Heatwaves and health: Guidance on warning-system development. WMO Publ. 1142, 96 pp., https://www.who.int/globalchange/publications/WMO_WHO_Heat_Health_Guidance_2015.pdf?ua51.

Zhang, L., Z. Zhang, T. Ye, M. Zhou, C. Wang, P. Yin, and B. Hou, 2018: Mortality effects of heat waves vary by age and area: A multi-area study in China. *Environ. Health*, 17, 54, <https://doi.org/10.1186/s12940-018-0398-6>.



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Urban Climate

journal homepage:



Climatic risk in the Mexico city metropolitan area due to urbanization



Nuria Vargas^a, Víctor Magaña^{b,*}

^a Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City 04510, Mexico

^b Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City 04510, Mexico

A B S T R A C T

The Mexico City Metropolitan Area (MCMA) had a rapid demographic and urban growth during the second half of the twentieth century that led to development of an intense Urban Heat Island (UHI). In the urbanized zone, the mean maximum and minimum temperatures have had significant increases of the order of 3 and 4°C during the last one hundred years. Even more, the areas of larger mean annual temperature approximately match the urbanization patterns, showing the MCMA UHI has expanded to the eastern – northeastern and northwestern zones, along with the urbanization. There has also been a change in the precipitation regime over most of the city, since annual mean precipitation, for instance over the western part of the MCMA, has increased in almost 40% during the last century. In summary, the natural hazards related to warm spells (maximum temperature > 30 °C) or intense storms (precipitation > 20 mm/day) have increased along with the UHI. When some factors of the MCMA vulnerability are considered (i.e., loss of natural vegetation), it is concluded that the urban growth of the region has led to higher climatic risk and to more negative impacts, such as urban floods.

1. Introduction

During the 20th century, Mexico City went through a rapid urbanization process that made it one of the largest and most populous cities in the world. From 1960 to 2010, the population quadrupled by going from 5 million inhabitants to over 20 million (CONAPO, 2010). Such demographic expansion took place in parallel with a significant increase of the metropolitan area, that changed natural vegetation to houses, roads, and urban infrastructure. The Mexico City Metropolitan Area (MCMA), changed from an area of almost 23 thousand hectares in the middle of the 20th century to over 163 thousand hectares in 2010. The urban growth of the MCMA has been chaotic and with little consideration on environmental aspects, such as conservation of the natural vegetation. Deforestation and removal of surface water bodies, such as rivers, led to the progressive and systematic reduction of the land surface elements that regulate climate in the Valley of Mexico. The rates, extents, and intensities of land cover and land use change (LCLUC) in the MCMA during the 20th century was significant, leading to large changes in ecosystems and environmental processes at local and even regional scales.

The rapid urbanization of MCMA involved a complex process of landscape transformation, alteration of the structure and function of original ecosystems. Its socioeconomic development lead to loss in the standards of living of the population. The Urban Heat Island (UHI) of the MCMA has been documented in several studies related to temperature increases or changes in its hydrological cycle (e.g., Jáuregui, 2000; Jáuregui and Romales, 1996; Cui and de Foy, 2012). The maximum temperature in western Mexico City has increased from around 22 °C in the late 19th century to more than 25 °C, i.e., more than 3 °C during the 20th century, mainly in relation to urbanization (Jáuregui, 2009). In recent decades, the areas affected by urbanization and warming are located in the central and eastern parts of the MCMA, where a large demographic density and low levels of vegetation prevail. Therefore, the intensity of the

* Corresponding author.

E-mail address: victormr@unam.mx (V. Magaña).

<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100644>

Received 1 May 2019; Received in revised form 9 February 2020; Accepted 6 May 2020

~~2025~~ © 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

MCMA UHI, has increased and varies depending on the level of urbanization and the existence of urban vegetation or surface water bodies (Colunga et al., 2015).

Land use modulates land surface temperature (LST) which in turn happens to be a key element to determine air temperature of the lower layer of the urban atmosphere. Surface radiation balances, and the spatial structure of urban thermal patterns and human comfort in cities is affected by the characteristics of the urbanization. Maximum and minimum temperatures in the MCMA depend on surface conditions, and the local circulations related to mountain breezes. Synoptic scale conditions may determine the occurrence of extreme weather conditions, such as heat or cold waves. However, the number and intensity of heat waves in the MCMA has increased in almost an order of magnitude (Jáuregui, 1997) during the last century mainly in relation to the UHI. Temperatures above 30 °C are becoming more frequent in a large area of the MCMA, and maximum temperatures close to 35 °C have already been reported, which constitutes a natural hazard for human health and comfort of the inhabitants of the MCMA (Harlan et al., 2006).

The urban atmosphere can be modified as the cities expand. The UHI reduces the atmospheric stability of the urban boundary layer and amplifies the uplift created by convergent airflow over the city under light synoptic wind regimes. The UHI appears to have a great influence in initiating moist deep convection (Baik et al., 2001). Under calm synoptic conditions, these effects can initiate convective thunderstorms (Bornstein and Lin, 2000). Various analyses show that the characteristics of the precipitation regime in the MCMA has changed (e.g., Jáuregui and Romales, 1996; Magaña et al., 2003; Ochoa et al., 2015), partially in response to the city growth and anthropogenic activities. The accumulated annual rainfall and the intensity of daily rainfall events in the western part of the MCMA shows a significant positive trend (Jáuregui, 2009). The number of extreme precipitation events in western Mexico City is almost an order of magnitude larger than a century ago. More intense storms, mainly during the wet season, constitute a natural hazard for a sector of the population under the risk of urban floods or landslides.

In this way, changes in maximum and minimum temperatures, as well as in rainfall, have increased climate risk in the MCMA in recent decades, mainly due to an unplanned urbanization process that has led to greater vulnerability (Pérez Corona, 2018). The gradual aging process of the population of the MCMA (Angel et al., 2016), the numerous irregular settlements in the periphery (Pérez Corona, 2018) with low socioeconomic conditions and poor urban services, as well as a rapid loss of ecosystem services due to deforestation and pollution, make the region more vulnerable and exposed to more frequent and intense extreme weather events. Heat waves or intense storms result more frequently in disasters that disrupt the everyday life of a large percentage of the population. Land use changes may have negative consequences by increasing climate risk, but the identification of the causes of such process may also serve to define risk management strategies. Information on the characteristics of urbanization process and the related human activity may help to define sustainable urban development policies (Chen et al., 2008). Thus, the objective of this paper is to document the evolution of meteorological hazards that constitute a risk, in relation to the MCMA UHI, and to show that some various characteristics of the urban development may result in the construction of vulnerability, which has increased the meteorological risk and the number of disasters.

The work includes an introduction, a section that describes the data and the methodology followed for the analyses, as well as a results section, where an approximation to the risk assessment is presented. In the final section, the study presents a synthesis of the main results and recommendations for risk management or adaptation to climate change at the urban level.

2. Data and methodology

The MCMA has a relatively dense network of surface weather stations, that allows the characterization of the spatial and temporal variations of meteorological parameters and the tendencies of regional climate. Surface weather stations report daily data of maximum and minimum temperature and precipitation, for the 1950 to 2015 period. The number of weather stations in the domain varies in time from around fifty in the early period (1950s) to more than two hundred in the late nineties and in recent years. A few (around twenty) weather stations have more than 80 years of daily data. Although most meteorological stations are located in urbanized zones, several exist in rural (vegetated) areas surrounding the MCMA. Meteorological data, from randomly distributed weather stations, are converted to gridded analysis by means of an objective analysis scheme which combines observations and first guess fields. The combination is performed by means of a successive correction method (Cressman, 1959),

by modifying the first guess field using the observations in the weather station in an iterative manner, i.e., until an error, given by the difference between the station value and the corrected grid value obtained by interpolation from the grid to that station, is lower than a threshold value. For the present analysis, the North American Regional Reanalysis (NARR) (NCEP, 2005) monthly climatologies of maximum and minimum temperature were used as first guess fields. The original $32 \text{ km} \times 32 \text{ km}$ fields were linearly interpolated to a $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ grid, which is considered the average distance among weather stations (Fig. 1). These first guess fields of temperature fields were further modified to include the effect of temperature variations with height, using a lapse rate of 6.5 K/km and a topography field of $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ spatial resolution. For the precipitation objective analyses, a zero first guess field was used. The resulting daily meteorological fields were obtained for the 1950–2015 period, which includes the period of rapid urban expansion in the MCMA in the late seventies. The urban extension during the period is presented for the 1950s, 1980 and 2005 (INEGI, 2017). In addition, the background vegetation conditions for the end of the rainy season (September 2000–2004) is presented in terms of the Enhanced Vegetation Index (EVI) (Huete et al., 2002). The EVI is used to make reference to vegetation cover patterns and regions of bare soil, where no urbanization exists. Low (high) EVI values indicate the absence (existence) of vegetation.

The time series of daily temperature and precipitation for most weather station were compared with data from the nearest grid point of the analyses to check their coherence and estimate the quality of the analyses. Most stations showed coherence values of around 0.8 or more over most of the domain suggesting an adequate representation of the actual data in the gridded fields.

The warming signal or the changes in the extreme precipitation events show in the station data and in the gridded data. There are

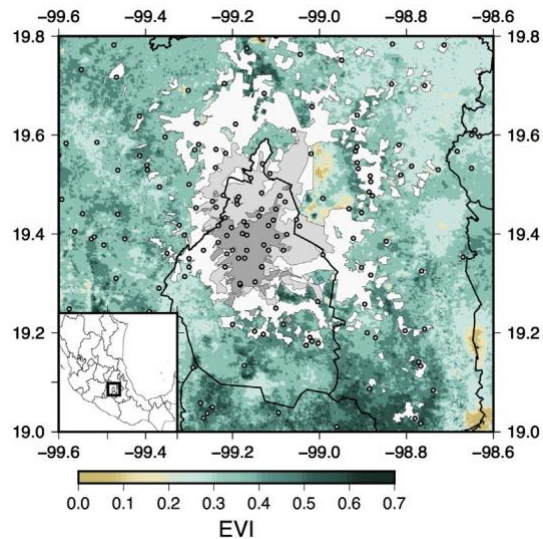


Fig. 1. Mexico City Metropolitan Area (MCMA) and urbanization in the late 1950s (dark gray), in the 1980s (medium gray) and in the mid 2000s (light gray). Small circles denote (average) number of surface weather stations used in the objective analysis. The surrounding colored region corresponds to average September values of the Enhanced Vegetation Index (EVI) for the 2000–2004 period.

local climatic variations observed in the stations data, that the gridded data tend to smooth out. Vertical walls, steel and concrete may induce microclimatic changes that only show in the station data (Shunlin et al., 2012). The climate change process related to the urbanization of the MCMA is examined by means of composite patterns for contrasting periods, before and after the explosive urbanization in the 1980s. Mean and extreme values of the maximum and minimum temperatures and daily precipitation are compared for the 1960–1985 and 1990–2015 periods. Regions with the largest climatic changes are identified and compared to urbanized and/or deforested regions.

The recent changes in the vegetation patterns over the domain were documented with the use of the Enhanced Vegetation Index (EVI) for the 2000–2016 period (Huete et al., 2002). The EVI permits to show how vegetation cover patterns change as the urban area expands. EVI data, with a biweekly temporal resolution and a $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ spatial resolution, is available at the International Research Institute (IRI) for Climate and Society database. Low values of EVI (less than 0.2) have been related to areas of low vegetation cover or bare soil. Moderate values (0.2–0.6) represent shrub and grassland or sparse vegetation, while high (more than 0.6) values indicate temperate and tropical forests. Temporally, the higher EVI values are observed in late September, after the end of the rainy season in Mexico.

Radiosondes data in the MCMA for the 1948–2018 period were also used to examine changes in the boundary layer atmospheric conditions, particularly in relation to precipitable water and atmospheric stability, that may determine changes in convective activity. The MCMA radiosonde site was first located in the western part of the city (Tacubaya) and remained there from 1948 until 1967, when it was moved to the Mexico City international Airport, in the northeastern part of Mexico City. It remained there from 1968 until 1998, when it was moved once more to the Tacubaya observatory, where it is until now. The long term records of the daily vertical thermal structure of the atmosphere allow for a temporal and spatial comparison of the vertical structure of the atmosphere over the UHI, for periods and regions with different levels of urbanization.

The vulnerability conditions to extreme weather and climatic conditions of the MCMA may be represented using socioeconomic information from the 2000 and 2010 census, available at the National Institute of Geography, Statistics and Informatics (INEGI, 2013). Data from the CENSUS include information on population density, and their socioeconomic conditions, including access to public services. Information on climate related impacts such as floods have been obtained from DesInventar (<https://www.desinventar.org/es/>). Data on the urban infrastructure (drainage system) have been obtained from the National Water Commission on Health Risks (COFEPRIS) and the Mexico City Public Water System (SACMEX). Breña-Pujol (2019), has summarized the main characteristics of the Hydraulic Infrastructure of the MCMA.

3. Results

3.1. Changes in temperature and precipitation in the MCMA

The demographic growth during the 20th century in the Valley of Mexico led to a rapid urban expansion and a warming process. The longest time series of daily meteorological data corresponds to the Tacubaya station (19°24'13"N, 99°11'46"W, 2308.6 m above sea level) in western Mexico City. Maximum and minimum temperature, as well as precipitation data show a large and robust positive trend from 1877 until 2019. Annual average maximum temperature in that location has increased in slightly more than 3 °C since the 1920s (Fig. 2), in correspondence to land use changes in the western part of Mexico City. Mean annual minimum temperature has

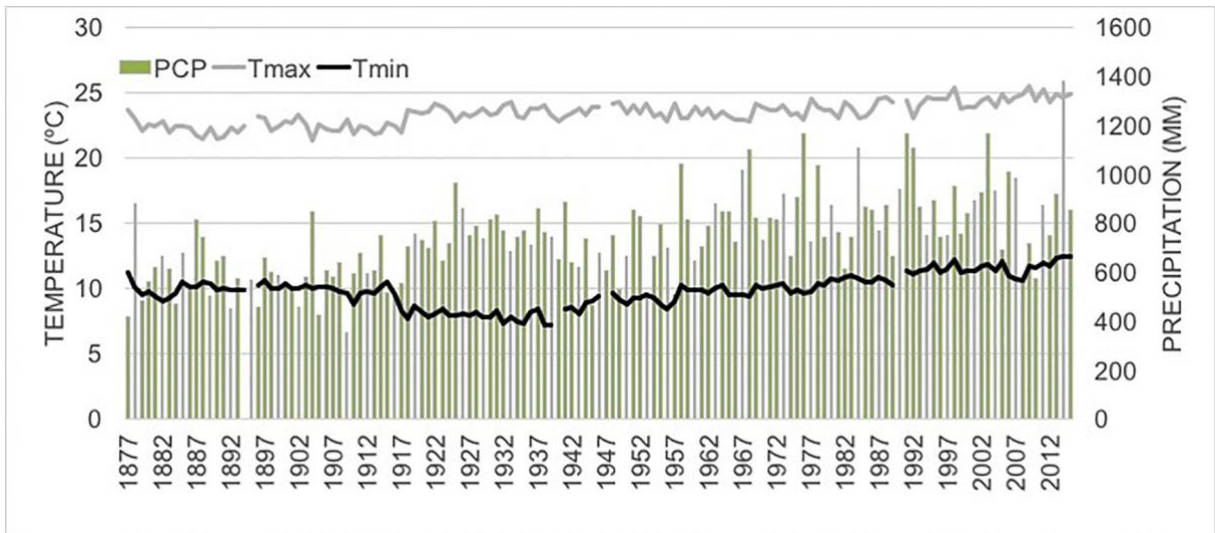


Fig. 2. Time series of mean annual maximum (gray line) and minimum (black line) temperatures (°C) and yearly accumulated precipitation (mm/yr) at the Tacubaya station, in western Mexico City, from 1877 to 2015.

increased in around 4 °C since the late 1930s. Annual accumulated precipitation at this point exhibits a long term positive trend, changing from around 600 mm/year by the end of the nineteenth century to more than 800 mm/year by the end of the twentieth century. Mean annual precipitation has diminished in recent years, with one of the driest episodes in 2009. Such decrease in annual mean rainfall may correspond to very low frequency climate variations, as those observed in the early 1900s or in the 1940s. The step shape transitions in the temperature and precipitation time series for Tacubaya appear to be associated with transition from a rural environment at the beginning of the twentieth century to a highly urbanized zone in recent years.

The 1980s decade corresponds to a period of rapid urban growth of the MCMA (Fig. 1), that led to a rapid local climatic change. Between the 1960–1985 and the 1990–2015 periods, the annual mean maximum temperature increased in almost 2 °C in the central part of the MCMA (Fig. 3a and b). The spatial pattern of the UHI, defined in terms of the 24 °C isotherm and a large horizontal temperature gradient, exhibits a correspondence with the mean urbanization. In the late 1990s and early 2000s, the urbanization mainly extended towards the northwestern and northeastern parts of Mexico City, into the neighboring state of Mexico. In those newly urbanized regions the increase in maximum temperature was of the order of 1 °C/decade.

The UHI may also be identified using the minimum temperature annual mean field. By examining the 8 °C isotherm, the UHI pattern is located over the central part of Mexico City in the 1960–1985 period (Fig. 3c). In the 1986–2015, the mean annual minimum temperature increased in more than 2 °C in central Mexico City and the 8 °C isotherm expanded into the northwestern and eastern parts of the MCMA (Fig. 3d). These are the regions of the MCMA that most expanded in the period.

Precipitation over the MCMA exhibits a spatial pattern highly determined by the orographic effects. Precipitation tends to be more intense over the slopes of the mountains in the southern and western parts of the Valley of Mexico. The objective analyses tend to show values of precipitation slightly lower than actual reports from the weather station (around 10% less in mean annual values). When the changes in precipitation for similar periods are analyzed, a decrease in annual mean precipitation is observed over most of the domain (Fig. 3e and f). This reduction in the mean annual precipitation of around 6% is similar to the one observed in Tacubaya between 1960 and 1985 and 1990–2015, that may correspond to the low frequency variations in convective activity over most of central Mexico (Méndez and Magaña, 2010). Precipitation in Mexico recurrently diminishes, as in the 1890s, 1940s or the 2000s as part of its natural climate variations (Méndez and Magaña, 2010). However, as observed in the Tacubaya station and other stations in the MCMA with records of more than 80 years there is a positive long term trend in annual rainfall.

Extreme climatic weather conditions have changed along with the long term trends in the mean climatic

conditions. For instance, the number of extreme maximum temperatures in the MCMA has increased over the urban area. The number of days with maximum temperatures above 30 °C has almost doubled in 30 days (Fig. 4a and b), mostly over the central eastern and northwestern parts of the domain, where the city has expanded and is densely populated, which implies that nowadays more people are exposed to warmer conditions during more days in a year. The signal of change and the effect of the UHI is clearer in extreme temperatures as those above 30 °C. In the eastern part of the MCMA, there may be more than 30 days with maximum temperatures above 30 °C. This is also one of the most densely populated parts of the city, which means that not only the climatic hazard is increasing, but the exposure and vulnerability as well (Jáuregui, 2009).

On the other hand, the minimum temperatures below 5 °C are now less frequent than they used to be a few decades ago. For instance, it was only in the central part of the MCMA that there used to be less than 50 days per year on the average, with minimum temperatures below this threshold. In recent decades however, the area with less than fifty days with minimum temperatures below 5 °C has expanded along with the urbanization (Fig. 5a and b). Human activities produce heat that has raised minimum temperatures in the urban area, while the relatively cold conditions remain almost unchanged over the surrounding mountains.

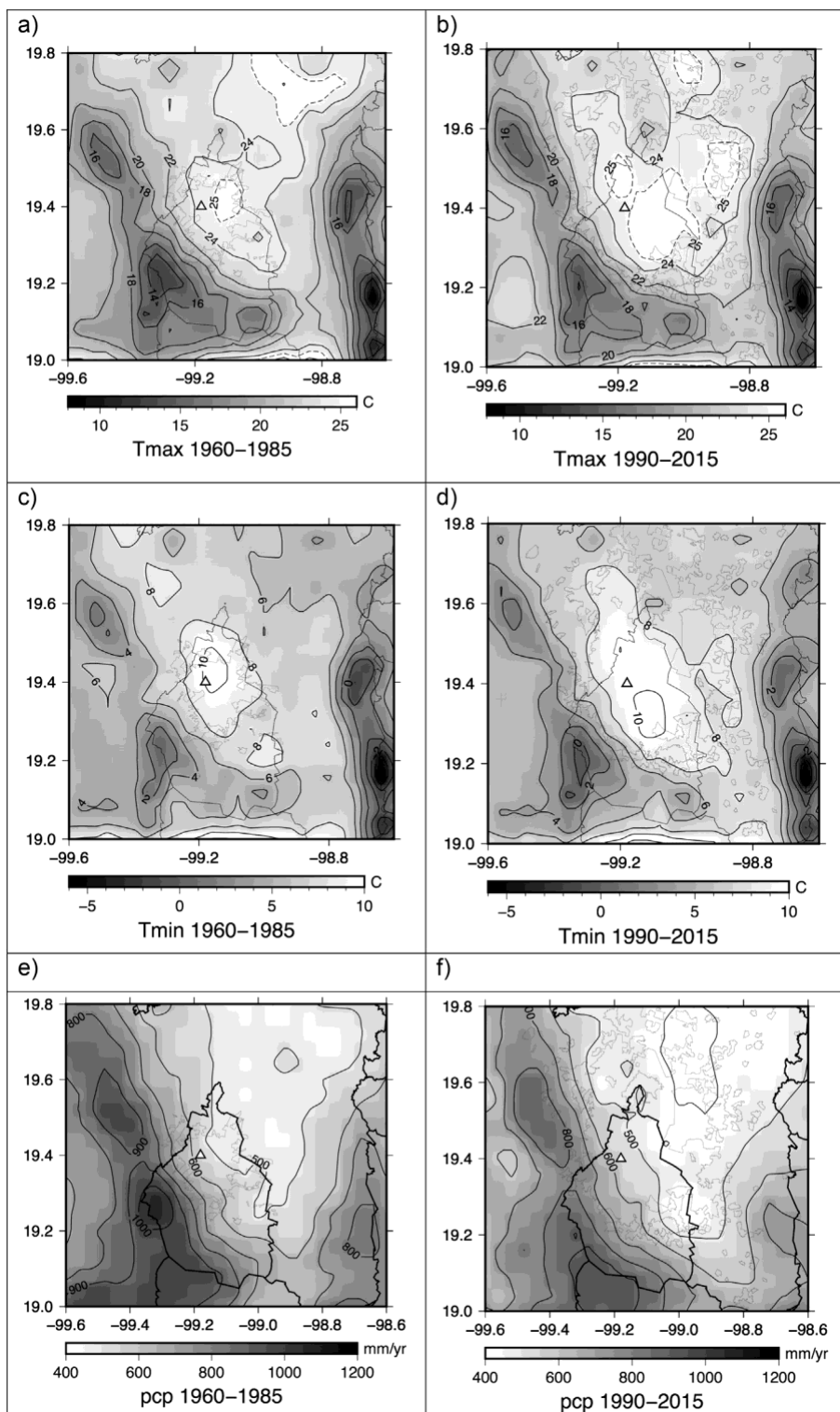


Fig. 3. Mean annual fields of a) and b) maximum temperature (°C), and c) and d) minimum temperature (°C), and annual accumulated precipitation (mm/yr) for the 1960–1985 (left column) and 1990–2015 (right column) periods. The dashed line indicates the 25 °C isotherm. The dark gray line indicates the urban extension in the 1960s (left column) and in the 2005 (right column) period. The triangle in the plots corresponds to the location of the Tacubaya weather station.

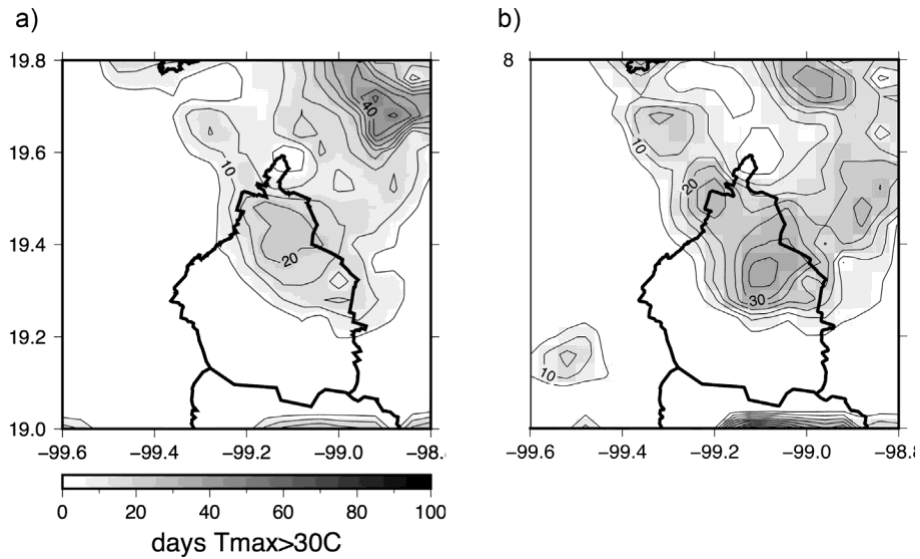


Fig. 4. Mean annual number of days with maximum temperature above 30 °C for the period a) 1960–1985, and b) 1990–2015.

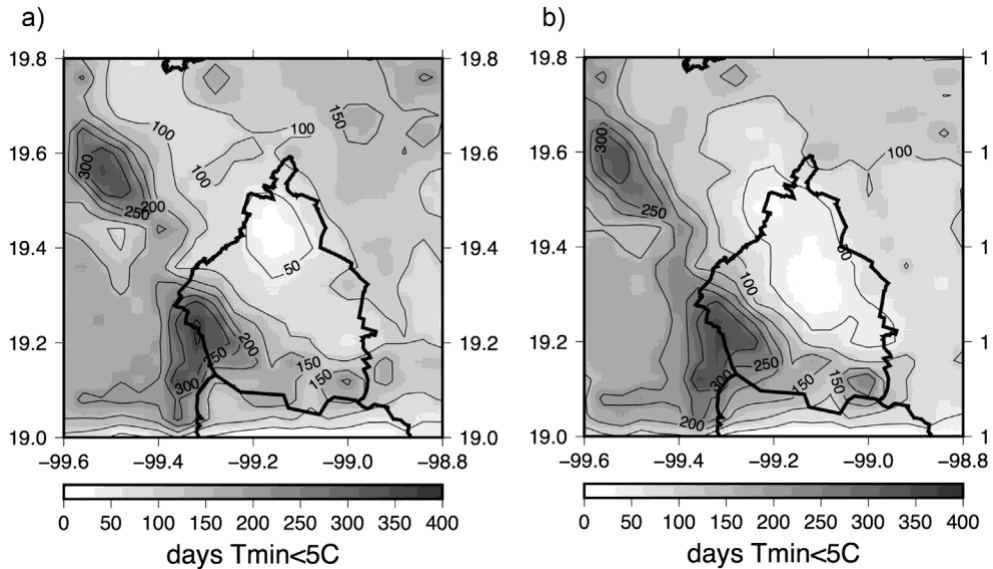


Fig. 5. Mean annual number of days with minimum temperature below 5 °C for the period a) 1960–1985, and b) 1990–2015.

The number of days with precipitation above 20 mm/day tends to be larger in the western and the southern parts of the MCMA, as in El Guarda weather station - 9022 (19.134 N, 99.173 W), where annual precipitation exceeds 1000 mm/yr with more than 50 events above 20 mm/day per year, where the orographic effect tends to intensify the storms. The threshold of 20 mm/day is used as a reference for an extreme rainfall event, considering that it is close to the percentile 95% of daily precipitation, and that precipitation events more intense than this value increase the risk of floods (Fig. 6). In recent years, there is an indication that the number of extreme precipitation events has decreased in parts of the domain under analysis, and consequently, total annual precipitation also tends to diminish (Fig. 3 c and 3 d). However, there appears to be a tendency since the 1950s for more intense storms. In various stations located at the various cardinal points of the MCMA, the records in the number of intense precipitation (days with more than 20 mm/day) show a positive trend (Fig. 6). The number of intense storms over most of the city appears to have doubled in around six decades. This is definitely an increase in a natural hazard that increases the chances of floods.

The increase in intense convective activity appears to be related to the UHI intensification after the second half of the twentieth century. As the UHI forms, the boundary layer atmosphere warms allowing for more atmospheric moisture to

accumulate and stability to decrease.

The tendency for more intense precipitation events over the MCMA appears to be related to two main forcing factors in the lower boundary conditions: i) changes in the specific humidity in tropical regions ([Bretherton et al., 2004](#)) and ii) changes in the

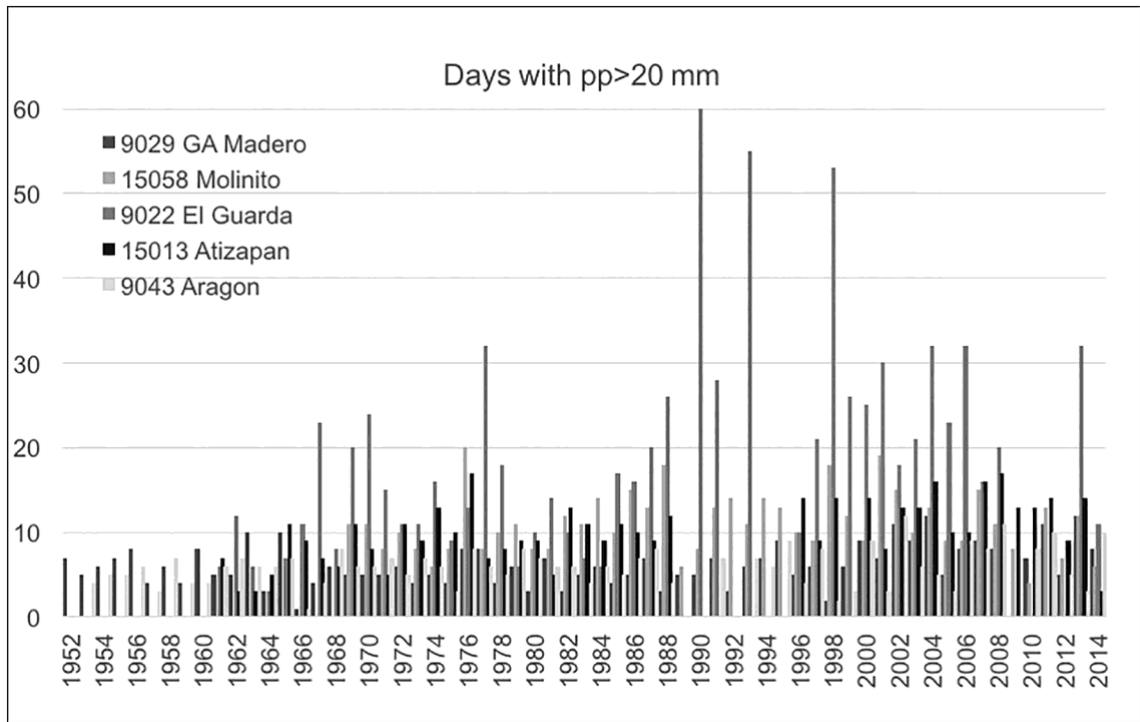


Fig. 6. Mean annual number of days with daily precipitation above 20 mm/day for various station in the MCMA, between 1950 and 2015. Madero(north), Molinito (west), El Guarda (south), Atizapan (northwest) and Aragon (northeast).

atmospheric stability in the boundary layer. Radiosonde site for Mexico City allows to compare two periods of time over Tacubaya, and the contrast in the location, between the eastern (Mexico City Airport) and the western regions of the Valley of Mexico. In both locations, the atmospheric surface temperature has increased which may result in a larger capacity to contain water vapor. Surface specific humidity distribution ranges from 2 g/kg to more than 20 g/kg throughout the year, with an average mean value of 8 g/kg. When the histograms of surface specific humidity are obtained for an older and a recent period, it is observed that there is a tendency for an increase in the number of days with humidity above 14 g/kg in Tacubaya (Fig. 7a) and more than 10 g/kg at the airport (Fig. 7b). The land use change in the western part of the MCMA, also reflects as an increase in the number of dry days, with specific humidity below 6 g/kg. Increases in surface specific humidity appear to be related to an increase in the total water vapor in the atmospheric column (Muller et al. 2009). Precipitable water was calculated with radiosonde data over Tacubaya and the Mexico City Airport (not shown) and their variations appear to be coherent with surface specific humidity.

CONAPO, 2010 The tendency for more intense precipitation events may be related more atmospheric humidity (and precipitable

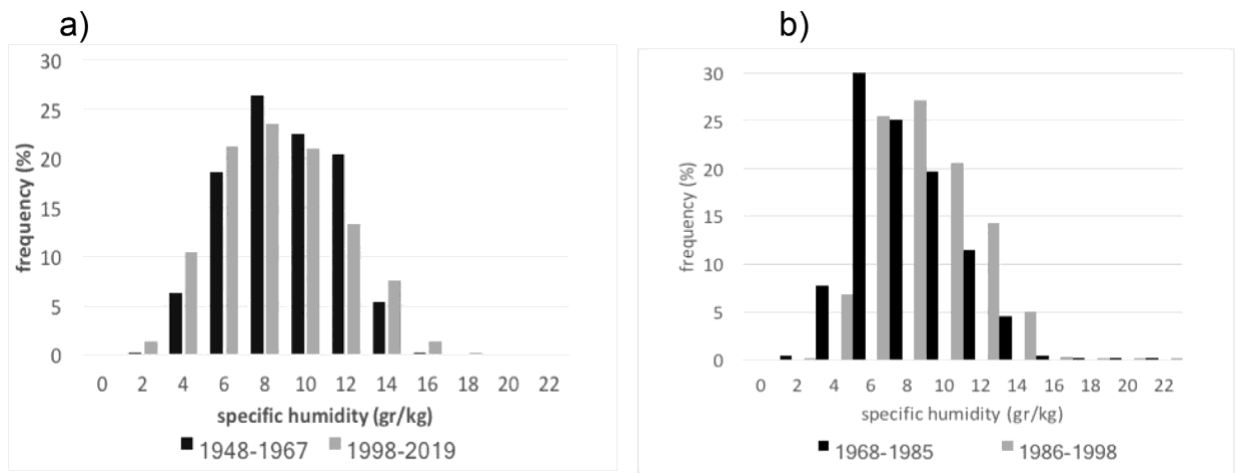


Fig. 7. Histograms of surface specific humidity (gr/kg) for two contrasting periods in a) Tacubaya (1948–1967) and (1998–2019), and b) at the Mexico City Airport (1968–1985) and (1986–1998) periods.

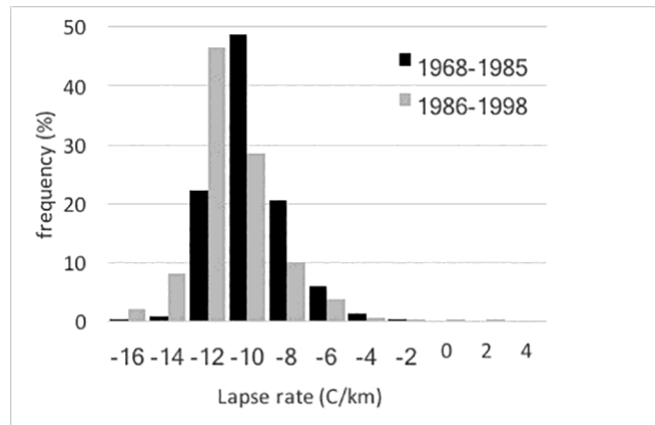


Fig. 8. Estimate of atmospheric stability in the boundary layer of the MCMA based on the air temperature and geopotential height, between surface and 700 hPa for the 1968–1985 (black column) and the 1986–1998 (gray column) periods.

water) in a warmer atmosphere. In addition, the UHI tends to produce changes in the atmospheric stability in the boundary layer. The atmospheric stability in the boundary layer over the MCMA has decreased as the surface temperature increases in relation to the UHI. The lower atmospheric stability may be analyzed using the sounding data for the Mexico City airport for two even periods of around fifteen years each (1968–1985 and 1986–1998). The result shows that most of the time the lower atmosphere is conditionally unstable, but frequently (30% of the time, in recent decades), it has a super-adiabatic lapse rate (Fig. 8). A super-adiabatic lapse rate occurs when the lapse rate is less than -10C/km (Hodge, 1956) and is associated with intense solar heating at the surface, in regions where the winds are weak and the soils are dry, as in the northeastern part of Mexico City. This type of stability is usually observed in the shallow layers of the atmosphere. A super-adiabatic lapse rate near the surface may lead to intense precipitation depending on the atmospheric moisture content, among other factors.

The previous analyses show that the lower atmospheric stability and larger atmospheric moisture may result in more intense convective activity and precipitation, i.e., and increased hazard. Depending on the vulnerability condition, the risk of urban flood may be larger.

A large number of studies focus on the human influence on global warming, neglecting the importance of factors that result in vulnerability and consequently, in a larger number of disasters in recent decades. Vulnerability and risk have no universally accepted definition, and there is no single “correct” or “best” conceptualization that would suite all assessment context. Factors of vulnerability to intense rains include, among others: population growth, poverty, insufficient urban infrastructure, and loss of ecosystem services.

The term climate vulnerability has been defined in many different ways, but it usually refers to the degree to which a system is susceptible to and unable to cope with adverse effects of climate change, including climate variability and extremes. One of the elements that increases vulnerability is exposure and given the rapid demographic growth of the MCMA population, the vulnerability has significantly increased, along with the frequency and magnitude of natural hazards. Climatic hazards and vulnerability lead to higher levels of climatic risk and consequently to a larger number of disasters.

There are various forms in which climate risk increases in the MCMA, but three of the most important ones are: i) the increase in urbanization, iii) lack of infrastructure, and ii) the loss of natural vegetation. In the case of the MCMA these factors are closely related since the need for housing and urban infrastructure leads to deforestation to occupy naturally vegetated regions. Changes in the natural vegetation may be observed by means of the Enhanced Vegetation Index (EVI). The loss of vegetation takes place as the urban area expands as in the western part of Mexico City (Fig. 9). The urban area has reduced values of vegetation and consequently, ecosystem services such as climate regulation. The deforestation process takes place mostly over the periphery of the urban area. It is over the western and southern mountains that surround the MCMA where the most intense precipitation events take place. But the loss of vegetation over the western part of the Valley of Mexico increase the runoff to the lower parts over the urbanized zone. The number of intense precipitation events ($\text{pcp} > 20 \text{ mm/day}$) have decreased in around four events per year over the last fifty

years, over the western part of the domain. In the southern part of the MCMA, the number of intense events have increased in around 4 to 5 events per year on the average. This means that over the western part, vulnerability increases, while the hazard is smaller. Over the southern part, the hazard is larger but vulnerability is relatively lower, due to the conservation of the forested area. In summary, risk of urban floods due to the increased extreme precipitation activity or the increase in vulnerability tend to result in more disasters of this kind in recent years (Fig. 10). A large number of urban floods in the central western part of the MCMA is observed, mainly due to the convergence of runoff from the mountains (Zúñiga and Magaña, 2017).

According to reports from Desinventar (2019) the number of floods in Mexico City has significantly increased mostly after 1998.

This tendency may be explained in terms of higher climatic risk. Even more, the occurrence of floods in a particular region of the MCMA is also related to insufficient drainage infrastructure.

The continuous deforestation process in the region, even in the so-called "natural protected area", in the southern part of the MCMA, has resulted in impervious surfaces that increase runoffs in the western and southern parts of the Mexico City Valley. In this way, more intense storms in the 20th century, along with increased vulnerability due to more population exposure, environmental

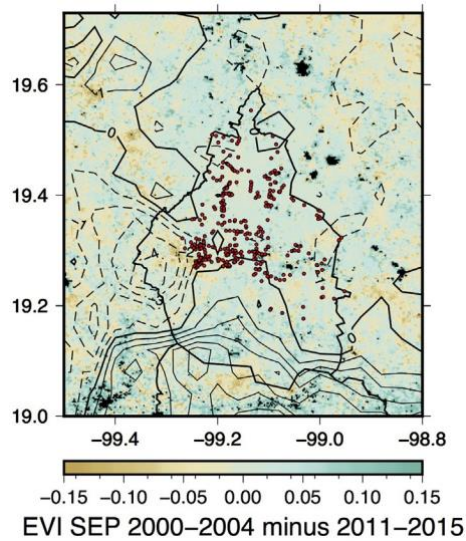


Fig. 9. Difference in the Enhanced Vegetation Index (EVI) around the MCMA for the average September condition, between the 2000–2004 and 2011–2016 periods. The black lines indicate the trend for the 1950–2015 in the number of precipitation events per year above 20 mm/day. The red dots show the locations of urban flooding events reported between 2007 and 2011. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

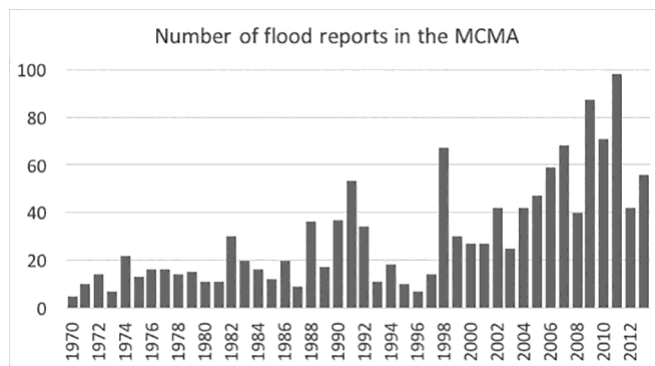


Fig. 10. Number of flood events reported in the Mexico City and State of Mexico regions between 1970 and 2013 (source: [Desinventar 2019](#)).

degradation and poor infrastructure increase the risk of floods in time and space.

The region where runoff from the mountains converges is also where most floods are reported. There, drainage infrastructure is meager (Fig. 11), which makes the region more vulnerable to intense rains and at risk of floods. There, population density is large and many people are affected by this type of disaster.

4. Summary and conclusions

The rapid demographic and urban growth of the MCMA during the twentieth century in recent years has led to the existence of an intense urban heat island that reflects in more episodes of intense heat and rains. The area where maximum temperatures are above 30 °C or minimum temperatures above 5 °C appear to coincide with the spatial extent of the urbanization, indicating the dynamics of the MCMA UHI. Intense precipitation events during the second half of the last century have increased in frequency and magnitude, mainly over the western mountains of the Mexico Valley.

The MCMA increases the climatic risk conditions mainly by the induced UHI effects and by increasing exposure of people and vulnerability conditions. Insufficient drainage infrastructure in the region where more runoffs occur reflect as a large number of urban floods that affect densely populated regions.

The urban growth of the MCMA has been chaotic leading to numerous irregular settlements in poor socioeconomic conditions, mainly in the eastern and northeastern parts of the urban areas and in the western slopes of the mountains.

The population in the periphery of the MCMA has rapidly grown including children and elderly people vulnerable to heat waves. This is the area of the MCMA where maximum temperatures above 30 °C are becoming more frequent, increasing the climatic risk of the population. If the UHI intensity and the number of warm spells continue augmenting, the climatic impacts on the health of the population may be high.

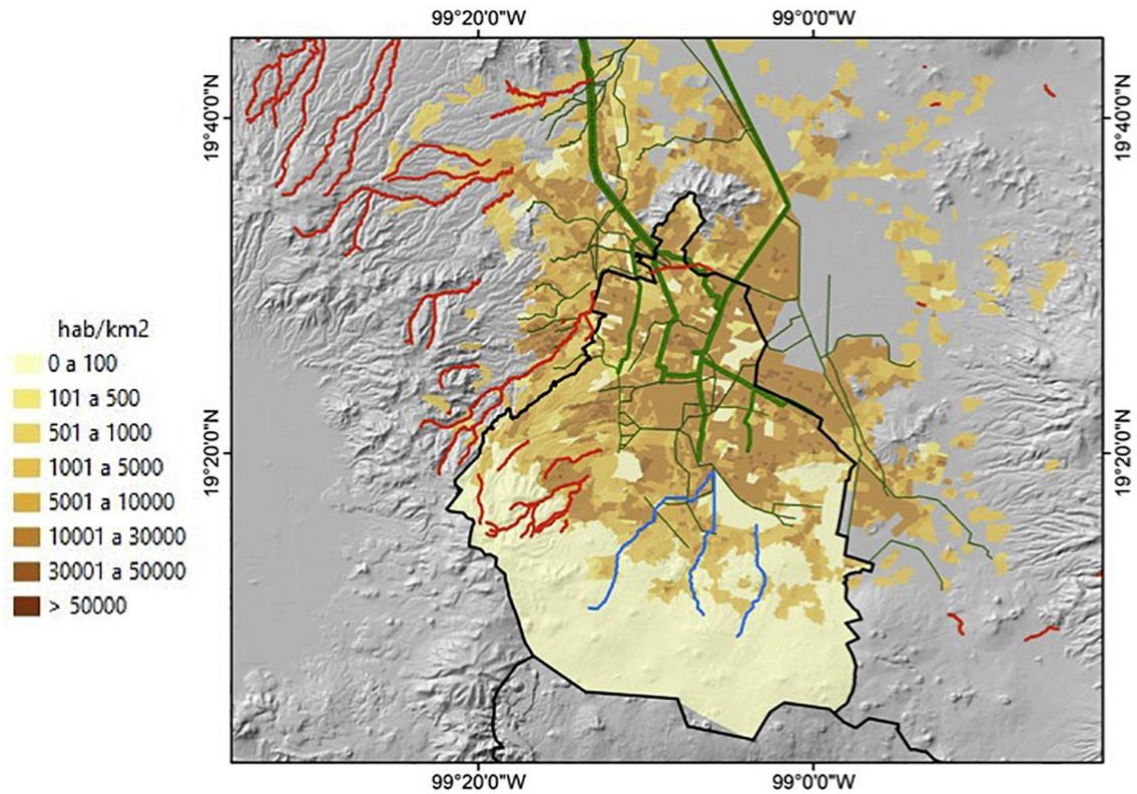


Fig. 11. Population density (per/km²) in the Mexico City region. Green lines correspond to the drainage system. Red lines correspond to the western rivers and blue lines to the southern rivers of the Valley of Mexico. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

The warming effects in the UHI may be reduced by a number of measures (Beaudoin and Gosselin, 2016). However, these options have not been implemented or even considered for the MCMA. The increased risk of floods also requires implementing various adaptation strategies.

The recovery or conservation of the ecosystem services in the mountains surrounding the MCMA appears to be of major importance if the risk of flood is to be reduced. The analysis of urban flood risk for recent years indicates that the slow but continuous process of deforestation is resulting in impervious surfaces that lead intense rainfall to runoff to the urban areas, in the lower parts of the valley. The spatial distribution of flood reports indicated that the “construction of vulnerability” in the upper parts of the mountains, also increases the vulnerability in regions of Mexico City that used to be considered as less vulnerable to intense rains. In other words, climate vulnerability construction in the MCMA is clearly a dynamical and multifactorial process.

If risk management actions to mitigate the UHI consider reforestation or actions to adapt vulnerable people to local climate change, the levels of risk in the near future may diminish. The actions aimed at preventing climate related disasters are less expensive than the recovery from climate related disasters, but they require an improved understanding of the factors that generate risk, for instance at the urban level.

Declaration of Competing Interest

The authors whose names are listed immediately below certify that they have NO affiliations with or involvement in any organization or entity with any financial interest (such as honoraria; educational grants; participation in speakers' bureaus; membership, employment, consultancies, stock ownership, or other equity interest; and expert testimony or patent-licensing arrangements), or non-financial interest (such as personal or professional relationships, affiliations, knowledge or beliefs) in the subject matter or materials discussed in this manuscript.

Acknowledgments

We thank Gustavo Vazquez, Tania Pérez and Moisés López for kindly helping with the preparation of meteorological data. Discussions with Ernesto Caetano, Emanuel Zúñiga and Eduardo Herrera on the dynamics of the UHI were extremely valuable. This project was financially supported with a grant from UNAM PAPIIT – 112717. Nuria Vargas was financially supported with a

CONACYT scholarship (371862). Financial support from the FORDECYT-CONACYT project 297506 is also appreciated.

References

- Angel, Jacqueline, Vega, W., López-Ortega, M., 2016. Aging in Mexico: Population Trends and Emerging Issues. *The Gerontologist*. 57. pp. gnw136. <https://doi.org/10.1093/geront/gnw136>.
- Baik, J., Kim, Y., Chun, H., 2001. Dry and moist convection forced by an urban heat island. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 40, 1462-1475. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<1462:DAMCFB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1462:DAMCFB>2.0.CO;2).
- Beaudoin, M., Gosselin, P., 2016. An effective public health program to reduce urban heat islands in Québec, Canada. *Rev. Panam. Salud Publica* 40 (3), 160-166. Bornstein, R., Lin, Q., 2000. Urban heat island and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies. *Atmos. Environ.* 34, 507-516. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00374-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00374-X).
- Breña-Pujol, A.F., 2019. *Hidrología Urbana*. Universidad Autónoma Metropolitana (e-book) available at. <http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/libro2-hidrologia/index.htm>.
- Bretherton, C., Peters, M., Back, L., 2004. Relationships Between Water Vapor Path and Precipitation Over the Tropical Oceans. 17. pp. 1517-1528. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<1517:RBWVPA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<1517:RBWVPA>2.0.CO;2).
- Chen, H., Jia, B., Lau, S., 2008. Sustainable urban form for Chinese compact cities: challenges of a rapid urbanized economy. *Habit. Int.* 1 (32), 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2007.06.005>.
- Colunga, M.L., Cabromón-Sandoval, V.H., Suzán-Azpiri, H., Guevara-Escobar, A., Luna-Soria, H., 2015. The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, Mexico. *Atmósfera* 28 (3), 205-218.
- CONAPO, 2010. Crecimiento Poblacional. accessed 25 september 2018. <https://www.gob.mx/conapo/documentos/visualizador-de-informacion-demografica-para-la-republica-mexicana-1950-2050-y-las-entidades-federativas-1970-2050?idiom=es>.
- Cressman, G.P., 1959. An operational objective analysis system. *Mon. Weather Rev.* 87 (10), 367-374. [https://doi.org/10.1175/15200493\(1959\)087<0367:A00AS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200493(1959)087<0367:A00AS>2.0.CO;2).
- 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. 5. pp. 855-868. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0104.1>.
- DesInventar, 2019. Project - Official Website. Date accessed: 6 Jan 2019. <http://www.desinventar.org/>.
- Harlan, S., Brazel, A., Prasad, L., Stefanov, L., Larsen, L., 2006. Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. *Soc. Sci. Med.* 63, 2847-2863. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2006.07.030>.
- Hodge, M.W., 1956. Superadiabatic lapse rates of temperature in radiosonde observations. *Mon. Weather Rev.* 84, 103-106.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 83 (1-2), 195-213.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México) - INEGI, 2013. Perfil sociodemográfico. Estados Unidos Mexicanos. Censo de Población y Vivienda 2010. ISBN978-607-494-531-7 (in Spanish), available at. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/default.html#Publicaciones>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México) - INEGI, 2017. Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250,000: serie VI. INEGI, México, pp. 204.
- Jáuregui, E., 1997. Heat island development in Mexico City. *Atmos. Environ.* 31, 3821-3831.
- Jáuregui, E., 2000. El Clima de la Ciudad de México. *Temas Selectos de Geografía de México*. UNAM-Plaza y Valdés (ISBN: 968-856-819-8. 131 pp.). Jáuregui, E., 2009. The heat spells of Mexico City. In: *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. 70. UNAM, pp. 71-76.
- Jáuregui, E., Romales, E., 1996. Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmos. Environ.* 30, 3383-3389. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(96\)00041-6](https://doi.org/10.1016/1352-2310(96)00041-6).
- Magaña, V., Pérez, J., Méndez, M., 2003. Diagnosis and prog-nosis of extreme precipitation events in the Mexico City basin. *Geofis. Int.* 42, 247-260.
- Méndez, M., Magaña, V., 2010. Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *J. Clim.* 23, 1175-1188. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3080.1>.
- Muller, C.J., Back, L.E., O’Gorman, P.A., Emanuel, K.A., 2009. A model for the relationship between tropical precipitation and column water vapor. *Geophys. Res. Lett.* 36. <https://doi.org/10.1029/2009GL039667>.
- National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce, 2005, updated monthly. NCEP North American Regional Reanalysis (NARR). Research Data Archive at the Physical Sciences Laboratory, NOAA. <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.narr.html>. Accessed 05 Aug 2017.
- Ochoa, C.A., Quintanar, A.I., Raga, G.B., Baumgardner, D., 2015. Changes in intense precipitation events in Mexico City. *J. Hydrometeorol.* 16, 1804-1820. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0081.1>.
- Pérez Corona, Javier, 2018. Periferia y desarrollo urbano metropolitano en el valle de México. In: *Dinámicas urbanas y perspectivas regionales de los estudios culturales y de género*. Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C. Coeditores, México ISBNUNAM: 978-607-30-0974-4, ISBN AMECIDER: 978-607-8632-05-3 (in Spanish).
- Shunlin, L., Li, X., Wang, J., 2012. Advanced Remote Sensing. Chapter 24: Land Cover and Land Use Changes. pp. 703-772. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385954-9.00006-X>.
- Zúñiga, E., Magaña, V., 2017. Vulnerability and Risk to Intense Rainfall in Mexico: The Effect of Land Use Cover Change. *Investigaciones Geográficas*. UNAM, Ciudad de México.