



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN GEOGRAFÍA

**EFFECTOS DE LAS TEMPERATURAS Y PRECIPITACIONES EXTREMAS EN EL
BIOCLIMA HUMANO DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE
MÉXICO POR CAMBIO CLIMÁTICO LOCAL Y GLOBAL.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

ELDA LUYANDO LÓPEZ

TUTOR PRINCIPAL: DR. ADALBERTO TEJEDA MARTÍNEZ

**FAC. DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA Y
CIENCIAS ATMOSFÉRICAS, UV**

COMITÉ TUTORAL:

**DRA. ANA CECILIA CONDE ÁLVAREZ
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM**

**DR. ADRIÁN GUILLERMO AGUILAR MARTÍNEZ
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM**

MÉXICO D.F., ENERO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Efectos de las temperaturas y precipitaciones extremas en el bioclima humano de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México por cambio climático local y global.

M. en G. Elda Luyando López
Doctorado en Geografía

Resumen	3
Introducción	4
1. Peligros climáticos urbanos 1.1 Peligros por hidrometeoros en el contexto urbano 1.2 Desastres por extremos climáticos 1.2.1 Aspectos de los peligros climáticos urbanos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México	11
2. La Zona Metropolitana de la Ciudad de México 2.1 Características físicas de la zona de asentamiento 2.2 Evolución de la Ciudad de México 2.3 Crecimiento de la cubierta urbana: zona urbana y periurbana 2.4 Principales aspectos socioeconómicos de la población	29
3. Efectos de las ciudades en el clima 3.1 La reducción a escala de una ciudad. La importancia como espacios modificados 3.2 Las modificaciones climáticas por la urbanización 3.3 Estimación de la <i>isla de calor</i>	50
4. Principales peligros hidroclimáticos y térmicos para la ZMCM 4.1 Frecuencia e intensidad de los eventos climáticos 4.1.1 Por precipitación 4.1.2 Por temperatura	82

5. Bioclima para la ZMCM 5.1 Escenarios climáticos para los horizontes 2015-2039 (cercano) y 2075 – 2099 (lejano) 5.2 Índices bioclimáticos y climogramas 1971-2000 (escenario base) 5.3 Bioclimatología horizontes 2015- 2039 y 2075 – 2099	119
6. Conclusiones	156
7. Referencias	162

Resumen

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), ubicada a 2,250 msnm en plena región tropical, está sujeta a la variabilidad natural del clima. Cada año, la precipitación (en episodios normales o extremos) afecta a la población ocasionando desastres en las zonas vulnerables debido a su ubicación y condición socioeconómica. A pesar de que el clima termal es benigno, la población sensible responde a la ocurrencia de eventos extraordinarios tanto de alta como de baja temperatura. Algunas enfermedades (principalmente de los sistemas circulatorio y respiratorio) se relacionan con los cambios térmicos, afectando los niveles de mortalidad. Los habitantes también deben añadir a la variabilidad normal del clima el efecto propiamente urbano que aporta la ciudad debido a los materiales con la que está construida. La ZMCM, al igual que el resto del mundo, sufrirá los efectos del cambio climático global, por lo que a las características climáticas actuales (clima regional más efecto urbano) hay que sumarle las anomalías previstas por los modelos de circulación general para México. Al cambiar el clima, podrían también cambiar las sensaciones térmicas, es decir, la forma en que la población percibe la temperatura. Tomar en cuenta estas condiciones respecto al clima actual y futuro podría ser conveniente para la planeación de estrategias que contribuyan a la adaptación de una población que demandará mayores suministros de agua y servicios de salud.

Introducción

El crecimiento explosivo de la ZMCM a partir de mediados del siglo XX, no es un fenómeno aislado. Tan sólo en los últimos cincuenta años, el número de habitantes en el planeta aumentó en un 150%, habiendo alcanzado los 6000 millones a finales del siglo pasado, (sumando mil millones más para el 2020) (ONU, 2013), crecimiento que en tan corto tiempo jamás se experimentó. Se espera que unas 700 millones de personas se habrían trasladado a áreas urbanas durante la última década de este siglo (Asimakopoulos *et al.*, 2011).

En coincidencia con la explosión demográfica, se experimentó un crecimiento en la población urbana, a causa de la búsqueda de mejores oportunidades y de la oferta de servicios y empleo que el medio rural no proporciona. La mala situación en cuanto a la tenencia de la tierra y la degradación ambiental también propiciaron este abandono del campo, sobre todo en los países en desarrollo. Durante los últimos cincuenta años del siglo XX, la población en las ciudades del mundo creció de un 29% a casi un 54%, y será, para el 2050, de 66% (UN, 2014).

Comenzó, también, una nueva manera de asumir el proceso de urbanización: la formación de megaciudades. El crecimiento de estos grandes núcleos urbanos ha representado, a menudo, una aglomeración descontrolada y sin contención a un ritmo por demás acelerado. Ante la incapacidad de mantener una mínima sostenibilidad a través del ya insuficiente ambiente que les rodea, se volvieron dependientes de sitios lejanos para su abastecimiento, tanto de alimento y agua como de energía. La demanda que representa una enorme población rompe con el vínculo de esa población con la naturaleza, ahora alejada de su realidad.

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) (también conocida como Zona Metropolitana del Valle de México, y para efectos de este trabajo denominada también como Ciudad de México), es un ejemplo de esta nueva concepción del espacio urbanizado y se inserta en la realidad de las naciones con megaciudades que responden de manera insuficiente a las necesidades de sus habitantes. La ZMCM se encuentra dentro de las cuatro megaciudades más importantes de América Latina junto con Sao Paulo, Río de Janeiro y Buenos Aires, en las que el crecimiento demográfico incontenido de los países pobres a lo largo de la segunda mitad del siglo XX (Mertins, 2011).

La ZMCM comprende el área urbanizada de 16 delegaciones del Distrito Federal, 59 municipios del Estado de México y uno del estado de Hidalgo. El crecimiento acelerado de la población en los últimos cincuenta años ha propiciado el establecimiento de

asentamientos periurbanos, generalmente irregulares, extendiendo las superficies edificadas e impermeables sobre terrenos otrora lacustres, agrícolas y forestales. Tal como sucede en la mayor parte del mundo, la población de menores recursos es la que ocupa los sitios menos adecuados y expuestos a mayores peligros, pues su poder adquisitivo les impide habitar otros mejor asentados.

La urbanización extensiva de este espacio ha modificado drásticamente el ambiente y las características originales del emplazamiento contribuyeron al acelerado deterioro. Las causas fueron, principalmente, la grave escasez de áreas verdes y el antiguo drenado de los lagos, en su momento una medida necesaria debido a la ocurrencia de las reiteradas inundaciones,

La cubierta natural se convirtió en una superficie urbana impermeable lo que propició la ocurrencia de inundaciones, encharcamientos y deslaves que tienden a ser, desde entonces, recurrentes. Además, debe sumarse el efecto de un aumento en la temperatura debido a las características térmicas de los materiales y los cañones urbanos formados por calles y edificios. Esta contribución urbana a las condiciones térmicas de la atmósfera es un fenómeno que se ha estudiado con especial atención.

Las afectaciones térmicas locales repercuten en la población, al contribuir con una aportación extra de calor a las condiciones, tanto sanitarias como de confortabilidad. Esta influencia urbana puede tener un efecto positivo en la época invernal y negativo en los meses más calurosos. Entre más extensa y densa sea la cubierta urbana, mayor será el efecto del ambiente térmico en la salud de los habitantes.

La Ciudad de México se caracteriza por lo benigno de su régimen termal, que tiene una presencia importante de temperaturas frescas y frías, aunque también, en sentido opuesto, una mayor frecuencia de días con temperaturas que superan los 30°C, sobre todo en las últimas décadas (Jáuregui, 2009).

Tomando en cuenta el efecto térmico local, y sumándole el efecto del cambio climático global, se aprecia un cambio significativo en las condiciones de confortabilidad y bienestar de la población urbana. Esta combinación de efectos locales-globales conduce a la ocurrencia de episodios más cálidos y a las consecuentes afectaciones a la salud de la población que es sensible al incremento de la temperatura. Los habitantes, cuando no están aclimatados, suelen mostrar una respuesta fisiológica a las condiciones climáticas, tanto a los extremos por frío como por calor que en ocasiones se traduce en enfermedades o en el recrudecimiento de padecimientos preexistentes.

Una mayor frecuencia de altas temperaturas puede significar noches más cálidas en las ciudades, incrementando el estrés térmico en sus habitantes, lo cual puede no necesariamente suceder en los que habitan las zonas rurales aledañas (McCarthy, 2011). El aumento en la frecuencia y la duración de temperaturas más altas agravan las condiciones en los edificios que no cuenten con clima artificial y extienden la duración de los periodos cálidos en los ambientes interiores (Sakka, 2012). Sin duda, esta tendencia habrá de repercutir aún más en el malestar de la población respecto a las condiciones de confortabilidad y salud en un futuro cercano.

De esta perspectiva, presente y futura, surge la pregunta central de esta investigación ¿cómo afecta y afectará el clima y sus extremos a las condiciones de bienestar y salud de la población que habita la Zona Metropolitana de la Ciudad de México?

En este trabajo se presenta un análisis de las condiciones climáticas de la ZMCM en relación al efecto que ejerce la precipitación y la temperatura sobre los habitantes y, a su vez, de cómo la urbanización ha modificado el clima. Ante la ocurrencia del cambio climático global, se ha propuesto evaluar cual será la respuesta de la población bajo condiciones térmicas diferentes a las actuales, lo que ocasionaría no sólo una falta de bienestar, sino también de condiciones sanitarias diferentes.

El objetivo general de este trabajo es, a partir de la exploración y análisis de la relación entre clima y la expansión de la cubierta urbana de la ZMCM, detectar posibles efectos en la población a causa de la temperatura y la precipitación, además de la estimación de las sensaciones térmicas en el futuro.

De este objetivo general, se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- Objetivo 1. Reconocer, como un gran modificador del ambiente y posible detonante de la ocurrencia de desastres, el crecimiento de la ZMCM.
- Objetivo 2. Relacionar los elementos hidroclimáticos de mayor impacto en la población de la ZMCM con su posible implicación en la ocurrencia de desastres.
- Objetivo 3. Identificar umbrales de temperatura que representen un cambio en la mortalidad en personas mayores a 65 años por enfermedades asociadas a altas y bajas temperaturas en la ZMCM.

- Objetivo 4. Elaborar una propuesta metodológica para una estimación ponderada de la intensidad de la isla de calor, la cual es espacial y temporalmente diferente en distintos sectores de la ZMCM.
- Objetivo 5. Estimar, a partir de la obtención del efecto urbano en el clima termal y de las salidas de los modelos de circulación general seleccionados para México, el bioclima de sitios representativos con distintos usos de suelo para un escenario base (1971-2000) y en un horizonte casi presente, denominado a su vez como cercano (2015-2039) y otro lejano (2075-2099).

A pesar de que la ciudad goza de un clima benigno, la variabilidad normal de la precipitación y la falta de planeación en el crecimiento de la ciudad ha desencadenado la ocurrencia de inundaciones, encharcamientos y deslaves que tienden a ser recurrentes, pero cuyos efectos en la zona metropolitana están diferenciados. Por otro lado, la mayor frecuencia de altas temperaturas tanto en las máximas como en las mínimas, hace suponer no sólo una modificación en el clima a escala global actual y futuro, sino también la influencia que ejerce la ciudad misma sobre la atmósfera a escala local.

A partir del reconocimiento de que la población de la ZMCM está sujeta a eventos climáticos (de origen pluvial y térmico) que propician desastres, se establece la hipótesis central de este trabajo, que supone que la relación *clima-población-crecimiento urbano* abarca más allá de la ocurrencia de desastres por eventos climáticos extremos. Es decir, se supone la existencia de relaciones *clima-población* todavía inexploradas, en las que no solamente inciden las condiciones propias de la variabilidad climática sino también las características de los asentamientos y condición socioeconómica de los habitantes.

Marco teórico – conceptual

En el campo de la climatología urbana, el estudio de los efectos que la ciudad ejerce sobre la atmósfera ha tenido, en las últimas décadas, un crecimiento más allá del puro conocimiento de la interacción física con el suelo subyacente. Oke (2006) enfatiza que el principal foco de atención está en la microescala, la escala local y la mesoescala, con interacciones entre el clima y las edificaciones y hasta regiones completas de una ciudad. El clima urbano debe ser considerado en un sentido amplio donde se incluya la interacción global y regional, condiciones para la comodidad en interiores y exteriores, la contaminación atmosférica y otros riesgos ambientales, impactos en la salud y de estrés en ambientes urbanos, los fenómenos meteorológicos extremos, entre otros (Ruth y Baklanov, 2012).

El avance en la tecnología ha causado un profundo impacto en las observaciones de la atmósfera urbana (Grimmond, 2006). De la misma manera, el avance en el uso de tecnología computacional ha aumentado la eficiencia del tratamiento en los datos, lo cual ha impulsado el desarrollo y el uso de modelos atmosféricos urbanos. Además, el cambio ambiental de dimensión humana, tanto local como global, han motivado muchos avances en la climatología urbana y ciencias de la atmósfera (Ruth y Baklanov, 2012).

Los estudios abocados al campo del clima urbano se han desarrollado principalmente en los países de latitudes medias (Grimmond, 2006), por lo general en ciudades con una marcada diferencia estacional, además, arquitectónica e históricamente distintos con respecto a las ubicados en los trópicos. Esta diferencia sustancial, deja al descubierto el déficit de un conocimiento suficiente en una parte del mundo donde, actualmente, crecen y se desbordan la mayor cantidad de ciudades de rápido crecimiento, con una gran exposición a los fenómenos naturales y de cara al cambio climático. Es necesario, por tanto, dar un impulso a los estudios climáticos urbanos en las regiones donde aun no son una prioridad en la investigación, pero que cada día ganan la atención de especialistas conscientes de la importancia de la relación clima-ciudad y la población que la habita. Finalmente, es esta población, mayoría en el mundo actual, quien se sujeta, se somete, padece, o bien se adapta a las modificaciones del clima por efectos de la superficie construida (cambios a escala local) y por efecto del cambio climático global.

El presente trabajo se enmarca en el campo de la climatología urbana, ateniéndose a una escala local-regional, tomando a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México como sitio de estudio. A diferencia de otras ciudades de México y el mundo, esta zona metropolitana ha sido estudiada con anterioridad a través de investigaciones realizadas desde mediados del siglo XX, principalmente por Ernesto Jáuregui, quien abordó las singularidades y modificaciones térmicas, pluviométricas, de calidad de aire, entre otras (Jáuregui 1959, 1960, 1963, 1965, 1971a, 1971b, 1973, 1974, 1987, 1991, 1993, 1997, 2000, 2009; y Jáuregui y Luyando, 1992; Jáuregui *et al.*, 1996; Jáuregui y Romales, 1996; Jáuregui y Tejeda, 1997; Jáuregui y Luyando, 1998; Jáuregui y Luyando, 1999; Jáuregui y Tejeda, 2001; Jáuregui y Tejeda, 2004).

Estos estudios impulsaron a otros más para que contribuyeran no sólo a desentrañar el papel de la urbanización en la atmósfera superficial, sino a elaborar opciones que condujeran a la prevención y la adaptación de la población.

El IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014) en el Quinto informe de Evaluación, contribución del Grupo de Trabajo II (Capítulo 8), enfatiza el impacto que sobre las áreas urbanas tiene el cambio climático, e incentiva, a su vez, el análisis y estudio de los componentes urbanos susceptibles de ser afectados de manera que los involucrados en la toma de decisiones propongan soluciones. Los objetivos anteriormente

planteados se involucran en estas propuestas, donde el fin último, y base de todo el estudio, es la población de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

El conocimiento del clima, sus amenazas y la posibilidad de cambios futuros reduciría sustancialmente la vulnerabilidad de una parte importante de la población en condiciones de un escenario presente.

Metodología

De las propuestas que se presentan en esta investigación, se distinguen principalmente dos tipos de metodologías: la primera se trata de una investigación documental donde se ubica a la ZMCM y su crecimiento en el contexto de las características climáticas del sitio, de las modificaciones históricas climáticas por efecto de ese crecimiento y de los efectos en la población de los principales elementos considerados, los cuales han sido generadores de desastres recurrentes. La segunda se refiere al tratamiento de datos, los cuales fueron obtenidos de distintas fuentes según el objetivo planteado. Registros de precipitación, temperatura, número de habitantes, ocurrencia de desastres: mortalidad por enfermedades, datos de salidas de modelos de circulación por cambio climático en la ZMCM, entre otros, fueron analizados según la propuesta que se muestra en los objetivos:

Objetivo	Metodología
1	Para conocer los efectos en la población de los elementos climáticos respecto del crecimiento de la ZMCM, se recurrió a una revisión de la literatura relacionada con ciudades y clima y la ocurrencia de desastres.
2	El análisis de información de desastres ocurridos en la ZMCM se vincula a episodios de precipitación de diferente intensidad (al ser el elemento más importante generador de desastres). Se recurrió a bases de datos diarios de la red perteneciente a la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) y Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) y de la base de datos de DESINVENTAR para el periodo 1970-2009.
3	A través de pruebas estadísticas, se analizan las temperaturas mínimas y máximas diarias y se relacionan con la mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio y del sistema respiratorio durante cuatro años

	representativos climáticamente en la ZMCM (El Niño, La Niña). Estas pruebas sensibles separan a las poblaciones de datos de manera que se pueda hallar un umbral de temperatura-mortalidad.
4	A partir del conocimiento de la existencia del fenómeno térmico de la isla de calor urbana, se obtiene un valor ponderado de la intensidad a través de la asignación de valores obtenidos por extensión en superficie de cada isoterma y de la cantidad de población contenida en ella. La información térmica se obtiene de redes de estaciones meteorológicas distribuidas en toda la zona metropolitana y la poblacional a través de las áreas geoestadísticas básicas (AGEBs) del censo 2010 del INEGI. El manejo de la información espacial se elabora utilizando el sistema de información geográfica Arcview. El proceso se realiza para tres periodos en el día: matutino, vespertino y nocturno en el año 2010.
5	Con la información obtenida de la isla de calor ponderada y con la proveniente de los modelos de circulación seleccionados para México y las salidas para un escenario de mayor impacto en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero, se estima el índice bioclimático de Missenard (1937) para condiciones de cambio climático en un futuro cercano y uno lejano en cuatro tipos de uso de suelo distintos. Se efectúan comparaciones con un escenario base (1970-2000) para establecer diferencias. Este índice que estima una experiencia térmica de los individuos, ocupa información de temperatura y humedad relativa horaria, obtenidas a partir de las máximas y mínimas diarias calculadas con un método de Tejeda <i>et al.</i> (1991). Los resultados se expresan de forma horaria a lo largo de todo el año.

Contenido del trabajo de investigación

Los objetivos y la metodología mostrada anteriormente conforman cinco capítulos que contienen análisis y propuestas distintas respecto al clima y sus afectaciones en la población de la ZMCM. El primer y segundo capítulos insertan a la ZMCM en un contexto mundial de afectaciones climáticas y de su posición como urbe de crecimiento desbordado y la consecuente modificación del medio. Sostiene para el sitio estudiado el conocimiento ya generalizado de que las metrópolis convertidas en megaciudades en países en vías de desarrollo, son espacios urbanizados que responden de manera insuficiente a las necesidades de sus habitantes, colocándolos en una situación de vulnerabilidad.

Los capítulos posteriores (3 a 5) conforman propuestas de análisis con distintos métodos para tratar la relación clima-habitante de la zona metropolitana. La precipitación y la temperatura, como principales variables de interés, se abordan desde la perspectiva del clima urbano en un escenario actual para el caso de la precipitación, y con un énfasis mayor en el tratamiento de la temperatura, incluso con un alcance en proyecciones a futuro a partir del fenómeno del cambio global del clima.

1. Peligros climáticos urbanos

Actualmente, la mayor parte de la población mundial habita en ciudades. Estas son el escenario donde se concentran población, bienes y actividades de alto valor económico y financiero. Esta circunstancia, y el hecho de un crecimiento acelerado y sin una debida planeación (sobre todo en países en vías de desarrollo) las coloca en una condición de vulnerabilidad ante el acontecimiento de fenómenos naturales. En este capítulo se abordará el tema de los elementos climáticos extremos que generan desastres en las ciudades. También se tratarán aspectos y se identificarán los peligros climáticos que conciernen a la ZMCM.

El acontecimiento de fenómenos naturales (atmosféricos, geológicos) carece de simplicidad, y en el caso de ser extraordinarios, pueden ser desencadenantes de situaciones más complejas porque se ve comprometida toda una historia de buena o mala adaptación. Se perciben de forma diferente, más atemorizantes y con perspectivas más dramáticas cuando la población afectada forma parte de una sociedad en desarrollo. Se ha de pensar que el 75% de la población urbana mundial se encuentra en países subdesarrollados, de los cuales un 30 a 60% habita en asentamientos irregulares (Satterthwaite *et al.*, 2009).

El fenómeno natural puede ser, por sí solo, de dimensiones considerables, pero tantas veces el riesgo reside en la combinación entre el fenómeno estrictamente natural y la falta de preparación de la población. Además, se pone a prueba la efectividad de las instituciones encargadas de proveer seguridad pues se gana o se pierde la confianza en los programas gubernamentales, y también se fortalece y se afianza la solidaridad de la población misma.

Un fenómeno natural de carácter extraordinario implica términos como peligro, amenaza, vulnerabilidad, desastre, catástrofe, etc. los cuales se han utilizado según diversos enfoques en respuesta a lo multidisciplinario y metodología de su estudio. Dada la dificultad de convenir en una terminología acorde a todos los ámbitos, se ha decidido adoptar algunos de los conceptos en referencia a la ocurrencia de los riesgos naturales, como lo asientan Ayala y Olcina (2002). Consideran que el riesgo natural es la posibilidad de que un territorio y la sociedad que lo habita pueda verse afectado por un fenómeno natural de rango extraordinario. La catástrofe son los efectos en una sociedad de un episodio natural de rango extraordinario. El desastre es el grado superior de una catástrofe que incluso obliga a la puesta en marcha de ayuda externa al territorio afectado. Incluye pérdidas humanas. Para efectos de este trabajo, catástrofe y desastre tendrán un significado indistinto. El riesgo es la posibilidad, y la catástrofe es la realidad,

lo sucedido. Es una infracción que el hombre comete sobre el territorio por la implantación inadecuada de actividades o asentamientos (Ayala y Olcina, 2002). Hay un daño o pérdida esperable a consecuencia de la acción de un peligro sobre un bien a preservar (vida humana, bienes económicos, etc.).

Ahora bien, un peligro significa entonces el proceso o fenómeno de carácter natural o tecnológico que puede originar daños a la población, los bienes materiales o el medio ambiente natural. El peligro, ya sea natural o tecnológico, tiene una intensidad o severidad, que se refleja como un conjunto de características con incidencia en su capacidad de producir daño.

Los fenómenos climáticos extremos se convertirán en una amenaza si la frecuencia del fenómeno tiene altas probabilidades de suceder, y como sugiere Wilches-Chaux (1993), el que se convierta o no en desastre, dependerá de la magnitud real con que efectivamente se manifieste el fenómeno y del nivel de vulnerabilidad de la comunidad.

Hacen aparición, entonces, términos de amplia utilización: riesgo, vulnerabilidad, exposición, susceptibilidad, sensibilidad, entre otros. Es necesario dar a conocer el riesgo que enfrenta una comunidad para que las autoridades se den a la tarea de tomar decisiones, no sólo como una probabilidad (que lo es) o como algo lejano y extraño, sino con la intención de evitar que “ese posible” se convierta en una realidad.

Ser vulnerable es tener una o varias debilidades que se evidencian ante un suceso perturbador ajeno y externo. Una población vulnerable es una población susceptible de ser dañada en sus habitantes y en sus bienes aun sin mediar siquiera un evento medianamente diferente a lo que dicta la normalidad. Una población vulnerable es una población frágil.

Toscana *et al.* (2008) en un contexto de peligros por eventos geomorfológicos, establecen que la vulnerabilidad es la incapacidad de respuesta y recuperación de la sociedad ante un peligro (geomorfológico), el cual modifica el entorno físico y la estructura económica, política y social. Adaptado a los peligros climáticos, esta definición se aproxima suficientemente según sea la severidad con que estos episodios se alejen de la normalidad. Su impacto puede ser o parecer menos dramático, pero puede definir, también, un antes y un después perdurable históricamente, como una referencia: antes y después de un huracán, después de una lluvia torrencial, antes de una sequía, etc., siempre ligado a los efectos destructivos que hayan podido ocasionar que en las ciudades densamente pobladas, corresponde a cuantiosos daños en un espacio muy reducido.

Esto conduce a preguntar, por tanto, qué elementos hacen entonces a una población vulnerable. En términos generales, la vulnerabilidad está directamente ligada al grado de desarrollo de las sociedades expuestas a cualquier tipo de amenaza. En el contexto del cambio climático, la vulnerabilidad se entiende como el potencial que existe hacia las personas de ser heridas, que pierdan la vida o que sufran un perjuicio por el impacto directo o indirecto del cambio en el clima (Satterthwaite *et al.*, 2009). Esto sugiere el desafío de calificar y clasificar las condiciones de los asentamientos humanos: social, económica y estructuralmente.

La vulnerabilidad será tomada como la define el IPCC, que la señala como una función de la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa de un lugar. La exposición se refiere a la naturaleza y al grado al que esté expuesto un sistema (IPCC, 2007), y la sensibilidad es el grado en el que un sistema es potencialmente modificado o afectado por un disturbio (ya sea interno, externo o un grupo de ellos). Ser susceptible es el que está en capacidad de ser modificado, tal como lo define la Real Academia de la Lengua Española (RAE, 2015).

1.1 Peligros por hidrometeoros en el contexto urbano

Un patrón común en las ciudades susceptibles de sufrir daños es que gran parte de su crecimiento ocurre fuera de los planes oficiales, ya que sus habitantes carecen de la capacidad económica de obtener una casa que cumpla con los mínimos de calidad y servicios (Bataillón, 1968), propios de las zonas asentadas regular y convenientemente. Se forman, entonces, grandes extensiones de zonas habitadas por asentamientos informales (fuera de la legalidad, cuando menos en el inicio de su establecimiento) sobre suelo de conservación y en condiciones precarias (Aguilar, 2009), en áreas casi siempre riesgosas, y que los habitantes con recursos suficientes han dejado de lado por inseguras. Es frecuente que estas zonas sólo regularicen su situación legal, más no la calidad de las habitaciones ni de los servicios. La legalidad del asentamiento no significa la eliminación del riesgo (Satterthwaite *et al.*, 2009), sino sólo el reconocimiento de que existe oficialmente.

Las grandes urbes subdesarrolladas son, por lo general, sitios que cuentan con mejores servicios que el resto del país pues poseen una extensa red de drenaje (más densa), agua entubada, energía eléctrica y servicios de salud más eficientes (Satterthwaite *et al.*, 2009). Se calcula que la población total de las ciudades en los países en desarrollo se duplique entre 2000 y 2030, mientras que el tamaño de las zonas edificadas se triplicará (ONU-HABITAT, 2011).

Pero la concentración de población, aunada a la presencia de industrias, bienes, etc. y la falta de un crecimiento dentro de una planificación estructurada las vuelve susceptibles de sufrir desastres ante eventos climáticos (o de otra índole).

En general, las ciudades de todo el mundo deberán afrontar los efectos proyectados del cambio del clima, como se presenta en el Cuadro 1, elaborado en el Informe Mundial Sobre Asentamientos Humanos 2011 (ONU-HABITAT). Según el IPCC (2007), los criterios de probabilidad de ocurrencia corresponden a: >95% casi seguro; >90% muy probable; >66% probable:

Cuadro 1. Principales efectos de temperaturas y fenómenos climáticos extremos en zonas urbanas ante la ocurrencia de cambio climático. Fuente: ONU-HABITAT, 2011..

Fenómenos climáticos	Probabilidad	Principales efectos pronosticados.
Días y noches menos fríos	Casi seguro	Disminución de la demanda de energía para la calefacción
Días y noches calurosos. Más frecuentes en la mayor parte de la superficie terrestre	Casi seguro	Aumento de la demanda de refrigeración
Temperaturas más cálidas	Casi seguro	Disminución de la interrupción del transporte debido a la nieve y efectos del hielo durante el turismo de invierno. Cambios en el permafrost (permafrost), daño a las construcciones e infraestructuras
Periodos cálidos/olas de calor. Más frecuentes en la mayor parte de la superficie terrestre	Muy probable	Reducción de la calidad de vida de la gente en áreas cálidas sin aire acondicionado. Impacto en la gente de avanzada edad, jóvenes y pobres. Pérdida de vidas humanas. Aumento del consumo de energía para el aire acondicionado.
Fuertes precipitaciones. Más frecuentes en la mayor parte de la superficie terrestre.	Muy probable	Problemas de asentamientos, comercio, transporte, y sociedades por inundación. Importante pérdida de vidas humanas, daños y pérdidas a la propiedad y a la infraestructura. Aumento del uso del agua de lluvia en producción de energía hidroeléctrica.

Aumento de las zonas afectadas por la sequía.	Probable	Escasez de agua para viviendas, industrias y servicios. Disminución de los potenciales para la producción de energía hidroeléctrica.
Aumento de la actividad de ciclones tropicales intensos	Probable	Problemas de asentamiento por inundaciones y fuertes vientos. Problemas con el suministro del agua. Retirada de las coberturas de riesgos en áreas vulnerables por las aseguradoras privadas (al menos en países desarrollados). Importantes pérdidas humanas, daños y pérdidas a la propiedad. Migración de la población.
Aumento de la incidencia del crecimiento extremo del nivel del mar	Probable	Aumento de los costes de la protección costera y de los costes de la reubicación del aprovechamiento del suelo. Menor disponibilidad de agua dulce por intrusión salina. Importantes pérdidas humanas, daños y pérdidas a la propiedad. Movimientos de población.

La población reacciona, fisiológicamente, a los efectos del comportamiento atmosférico (Cuadro 2).

Cuadro 2. Resumen de efectos provocados por el tiempo atmosférico y el clima en la salud urbana. Fuente: Kovats y Akhtar (2009).

Resultados en la salud	Efectos conocidos
Estrés por calor	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la mortalidad en adultos mayores y enfermos crónicos con altas temperaturas. • Enfermedades relacionadas con el calor y muertes debidas a olas de calor.
Mortalidad y morbilidad relacionada con la contaminación del aire	<ul style="list-style-type: none"> • El tiempo atmosférico afecta las concentraciones de contaminantes.
Impactos en la salud por desastres	<ul style="list-style-type: none"> • Las condiciones del tiempo afectan la

causados por el tiempo atmosférico

distribución, la estacionalidad y la producción de alérgenos.

- Las inundaciones, los deslizamientos de laderas y los vendavales causan efectos directos (muertos y heridos) y efectos indirectos (enfermedades infecciosas, pérdidas en los suministros de alimentos, morbilidad psicológica a largo plazo).

Enfermedades transmitidas por mosquitos y garrapatas

- Las altas temperaturas reducen el tiempo de desarrollo de los patógenos en los vectores e incrementa el potencial de transmisión a los humanos.
- Las especies de vectores requieren condiciones climáticas específicas (temperatura, humedad) para ser suficientemente abundantes y mantener el nivel de transmisión.

Enfermedades transmitidas por agua y alimentos

- La sobrevivencia de importantes patógenos bacterianos está relacionada con la temperatura.
- Las precipitaciones extremas pueden afectar el transporte de organismos causantes de enfermedades en los suministros de agua; los brotes de enfermedades que se transmiten por el agua se asocian con la contaminación causada por lluvias intensas e inundaciones asociadas con un saneamiento inadecuado.
- Incrementos en las condiciones de sequía pueden afectar la disponibilidad y calidad del agua debido al poco caudal.

Los fenómenos atmosféricos que inciden en las ciudades corresponden, por tanto, a la ubicación geográfica, y los efectos que causan corresponden a las condiciones de vulnerabilidad de los asentamientos. Los embates de los fenómenos climáticos diferencian a las ciudades por el tipo de peligro a que puedan estar expuestas, si son principalmente afectadas por huracanes y/o precipitaciones intensas, por temperaturas muy cálidas, sequías, etc.

Existen en el mundo ciudades que, en un efecto acumulativo, reúnen el riesgo de padecer diversas amenazas meteorológicas (Fig. 1), donde el centro y sur de México se observa como severamente afectado, al igual que el sur y sureste asiático.

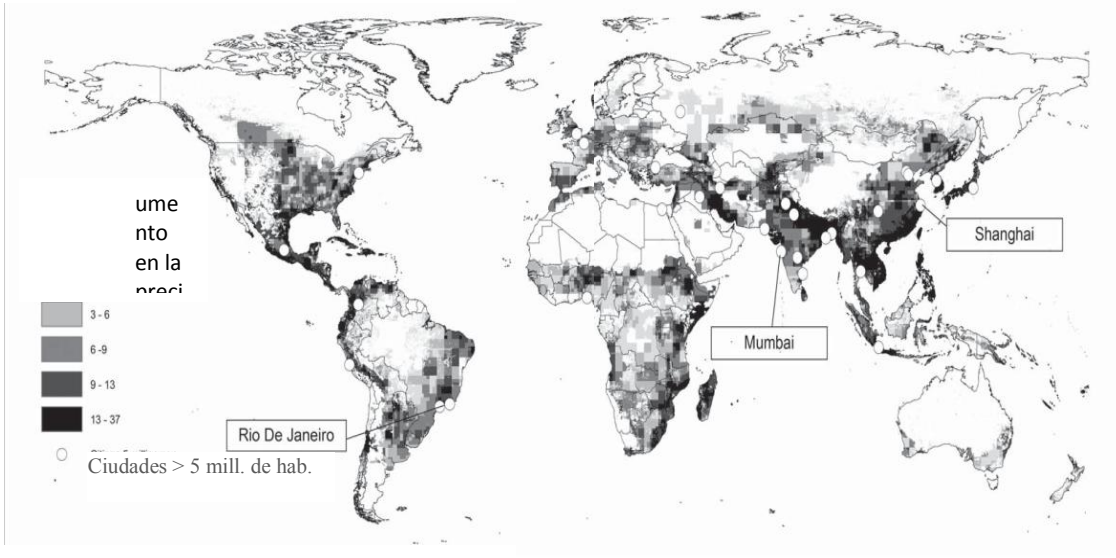


Fig. 1. Ciudades grandes en relación con riesgos climáticos actuales. Las zonas urbanas marcadas en este mapa tienen una población superior a 5 millones de habitantes. El riesgo de peligro (hazard risk) representa un nivel acumulativo basado en el riesgo de ciclones, inundaciones, desprendimientos de tierra y sequías. Fuente: de Sherbinin *et al.*, 2007.

Los mayores desastres mundiales ocasionados por fenómenos climáticos han sido, en primer lugar, las inundaciones (Fig. 2) seguidas por las olas de calor, los fríos intensos y las sequías. Las tormentas de vientos arrachados y las tormentas eléctricas también han causado severos daños a la población. Los fenómenos climáticos de mayor relevancia mundial por su ocurrencia y devastación son las precipitaciones y las olas de calor (Martin-Vide, 2009; Oxfam, 2007).

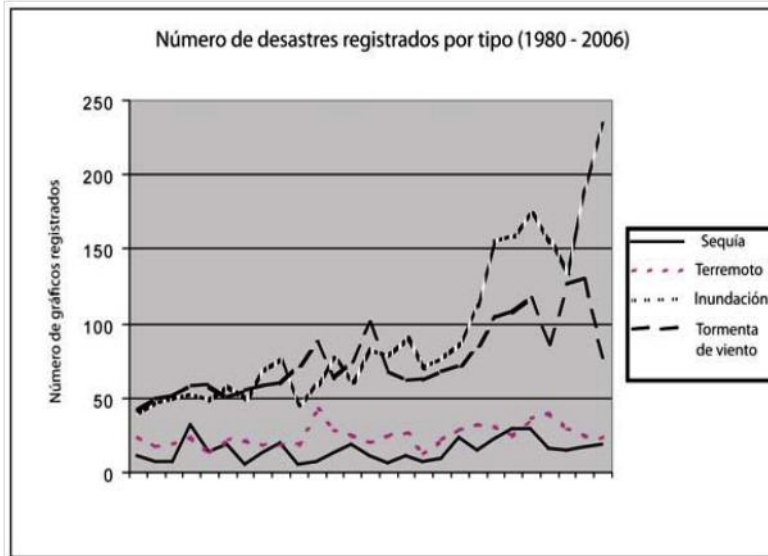


Fig. 2. Fuente: EM-DAT gráfico: EIRD en Disaster Risk Reduction: 2007 Global Overview, Global Platform for Disaster Risk Reduction.

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2012) precisa que el cambio climático proyecta un ciclo hidrológico más intenso en todo el planeta cuando menos durante el presente siglo, por lo que se espera que las sequías sean más intensas y prolongadas, y se presente un mayor número de eventos de precipitación fuerte.

Las precipitaciones, cada vez más concentradas y más intensas han causado severas inundaciones en países tan distantes como el Reino Unido, Vietnam, Sudáfrica, México e India (Fig. 3).

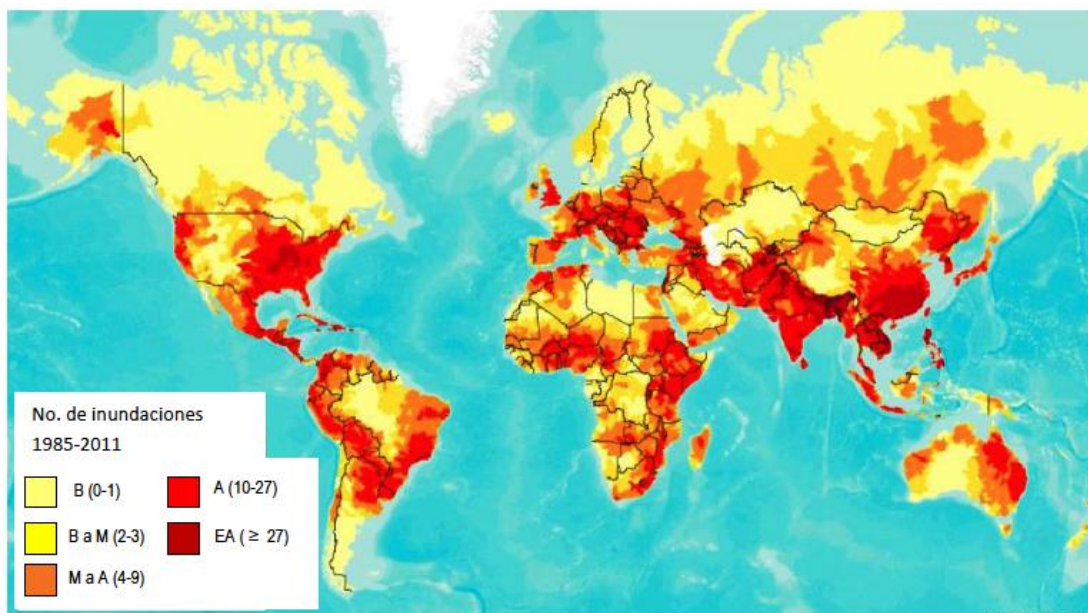


Fig. 3. Número de inundaciones registradas de 1985 a 2011. B= Bajo, B a M= Bajo a Medio, M a A= Medio a Alto, A= Alto, EA= Extremadamente Alto. Fuente: World Resources Institute: Aqueduct Water Risk Atlas, con datos del Brakenridge, Dartmouth Flood Observatory 2011.

La percepción de que episodios climáticos extremos han ocurrido con mayor frecuencia en las últimas décadas no es una idea apartada de la realidad, como las sequías (en Vietnam), extremos climáticos y estaciones impredecibles (Oxfam, 2007). En África en las últimas tres décadas, afectaron a más de un millón de personas por inundaciones. Tan sólo en el año 2007, México padeció los efectos de huracanes, tormentas tropicales y lluvias inusualmente intensas, donde el estado de Tabasco se vio severamente afectado (Oxfam, 2007). Los impactos por huracanes de alta intensidad han aumentado en las últimas décadas (1970-2009), en especial los de categoría 3, 4 y 5 en el Golfo de México y Caribe, y una disminución en el Pacífico (donde han aumentado las tormentas tropicales) (INECC, 2012).

En América Latina el principal factor de riesgo para la población son las precipitaciones (y las consecuentes inundaciones). El segundo factor (de origen natural) son los terremotos, y el tercero los huracanes (Lugo, 2002) y la precipitación que acarrear, donde el mayor número de población afectada se encuentra en las ciudades. En muchas de las urbes con frecuencia se hallan asentamientos humanos en las riberas, situación común en países en vías de desarrollo, convirtiendo en riesgosas las zonas que deberían permanecer desocupadas. El nivel de peligro que representan las precipitaciones depende del grado de saturación del suelo, sin embargo en las ciudades suele haber una reducida infiltración y un importante proceso de escurrimiento.

El comportamiento de las precipitaciones y su transformación en caudales es fundamental en el estudio de las inundaciones. También lo son el área, la red del drenaje o la morfología de los cauces que actúan de manera más o menos autónoma durante el proceso de generación de las avenidas (González, 2008).

El segundo factor climático de mayor relevancia en afectación a la población es la temperatura. Respecto a ella, las ciudades juegan un papel decisivo en el proceso de modificación climática por calentamiento. Las grandes urbes se han convertido en las mayores contribuyentes del calentamiento global al ser las generadoras de aproximadamente el 67% de los gases de efecto invernadero, las cuales consumen casi el 80% de la energía que se genera mundialmente (Barcena y Tiessen, 2013), más el calentamiento adicional por efecto de los materiales en las construcciones urbanas. Las olas de calor han aumentado su incidencia pues han crecido cinco veces más a lo largo de los últimos 20 años (Oxfam, 2007).

La relación altas temperaturas–mortalidad motivó a Gosling *et al.* (2007) a desarrollar un modelo con proyecciones del efecto del futuro cambio del clima basando su estudio en las observaciones de seis ciudades en el mundo (todas de países desarrollados) donde se examinan los efectos de las ondas de calor respecto a los índices de mortalidad, aclarando que los efectos directos de los extremos de temperatura no son siempre inmediatos. El aumento en el uso de aire acondicionado (cuando menos en la ciudad de Nueva York) ha contribuido a una disminución sustancial en los decesos relacionados con estos episodios extremos.

La población de estos países, acostumbrada al uso de la energía para enfriar, podría acusar severas afectaciones si en un futuro no tuviese acceso a los recursos necesarios para mantener una calidad de vida climática intramuros (Meze-Hausken, 2008). Los embates de episodios climáticos extremos se sortean, actualmente, a través de la disponibilidad energética, hídrica y tecnológica.

Sin embargo, las ciudades a pesar de ser las principales contribuyentes al incremento de la temperatura en el planeta, ocupan menos del 3% de la superficie terrestre (de Sherbinin, 2007). Sobre ese porcentaje tan reducido de cubierta urbanizada, el cambio de las condiciones de la atmósfera es aun más acentuado. El calentamiento de la atmósfera a nivel local es la respuesta térmica a la cubierta artificial del suelo que absorbe calor durante el día y lo libera durante la noche. A este fenómeno se le conoce como *isla de calor* (cuya formación y dinámica se explicarán en el Capítulo 3). A la fecha, no se conoce que sea un fenómeno causante de víctimas mortales, sin embargo, puede ser un factor

determinante si se asocia a la ocurrencia de periodos largos de altas temperaturas en los veranos, conocidos como olas de calor, causantes de un aumento en la mortalidad.

Las perspectivas futuras contemplan para las ciudades aumentos significativos en las temperaturas producto de la combinación *isla de calor-ola de calor* contribuyendo al aumento en la mortalidad (por enfermedades infecciosas y no infecciosas) tanto en los países subdesarrollados como en los desarrollados. El IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007) ha remarcado que el aumento térmico mostrado durante el siglo XX continuará durante el XXI, la mayor parte de la población mundial se habrá establecido en ciudades de crecimiento acelerado (sobre todo la de países en vías de desarrollo), lo que tendrá como consecuencia una intensificación en la isla de calor. Los habitantes buscarán paliar los efectos de los extremos de temperatura a través del consumo de agua y del uso del clima artificialmente frío (la reducida población con acceso y recursos, por supuesto). La población más vulnerable, la más sensible a los episodios cálidos recurrentes (los adultos mayores y los niños) seguirán padeciendo el impacto en su salud y engrosando las estadísticas de mortalidad.

Es entonces que una de las principales preocupaciones dentro del cambio del clima (global y local) y sus efectos radica en los límites fisiológicos, e incluso psicológicos, de los humanos ante condiciones de episodios extremos. El establecimiento de estos límites es algo sumamente complejo de definir, no existe una relación universal entre una variante climática y una respuesta particular, los límites son multidimensionales, se desarrollan a través del tiempo, en el espacio y por sectores (Meze-Hausken, 2008). Un episodio extremo en una ciudad puede ser parte de la normalidad en otra, los límites en ambas son totalmente distintos y el proceso de adaptación también. La intensidad de una anomalía climática que la población está, digamos, dispuesta a tolerar, varía en las distintas sociedades.

1.2 Desastres por extremos climáticos

La artificialización del suelo ha abarcado áreas no susceptibles de ser habitadas, áreas sujetas de sufrir inundaciones, erosión, deslaves, etc. No es el hombre el que se amolda a su entorno físico, es el medio el que se ha desnaturalizado para dar acogida a un número creciente de personas y de actividades (Capel *et al.*, 2000). Las ciudades constituyen nuevos desafíos por tratarse de sitios que han creado o modificado amenazas, vulnerabilidades y nuevos escenarios posibles de desastre, principalmente cuando la pobreza se convierte en un multiplicador de los efectos de los eventos naturales de rango extraordinario (Ayala-Olcina, 2002).

Se suele percibir, cuando en las grandes urbes se origina un desastre de grandes proporciones, que los fenómenos naturales (climáticos o geológicos) tienden a ser cada vez más intensos, cuando posiblemente, en algunos casos, son las sociedades las que se tornan cada vez más vulnerables al asentarse de forma inconveniente.

Cuando se habla de catástrofe, es decir, de los efectos en una sociedad de un episodio natural de rango extraordinario, o de un desastre, no se debe perder de vista que hay aspectos (al considerar un sitio vulnerable) que dependen del tiempo. Los desastres se contemplan en una escala de temporalidad (Cuadro 3), la ocurrencia de un evento severo es relativa al lapso que se emplee como referencia, de esto depende el grado o nivel de peligro que ofrece el fenómeno considerado con un territorio, comunidad o población expuesta (González, 2008).

Cuadro 3. La escala de tiempo en que los diferentes desastres, por lo general, causan sus efectos. Fuente: Gill (2008; adaptado de Hidore, 1996).

Escala de tiempo de desastres

<i>Segundos</i>	<i>Minutos</i>	<i>Horas</i>	<i>Días</i>	<i>Años</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Relámpagos • Terremotos • Derrumbes • Avalanchas • Meteoritos • Bolas de fuego atmosféricas 	<ul style="list-style-type: none"> • Tornados • Granizadas • Tsunamis 	<ul style="list-style-type: none"> • Ventiscas • Crecidas de ríos • Erupciones volcánicas 	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas de calor • Ondas de frío • Crecidas de ríos • Ciclones • Multiplicación de insectos 	<ul style="list-style-type: none"> • Sequía • Epidemia • Guerra

Los principales desastres hidrometeorológicos a nivel mundial corresponden a los ocasionados por inundaciones, temperaturas extremas y vendavales (Fig. 4). (Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y Media Luna Roja, IFRC, 2013).

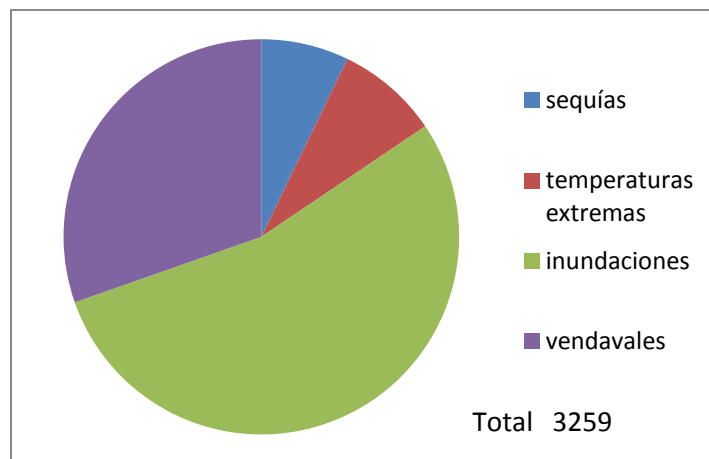


Fig. 4. Total de desastres por los principales hidrometeoros en el mundo. Periodo 2003-2012. Fuente: elaboración propia con base en los datos del World Disasters Report 2013, IFRC.

En el periodo 2003-2013, un total de 56,886 personas resultaron muertas por inundaciones en el mundo, sin embargo, el número de decesos por temperaturas extremas fue de 144,714, colocándose de esta manera en el primer sitio por número de víctimas, (IFRC, 2013). A pesar de esta diferencia sustancial, son las inundaciones quienes generan altísimos costos de rehabilitación, la cual suele no ser la apropiada para hacer frente a la variabilidad climática. Es de esperar que las precipitaciones de mayor intensidad previstas a futuro rebasen aun más la capacidad de las ciudades en los países en vías de desarrollo, si se compara con la tendencia de la última década respecto a lo ocurrido entre 1950 y 1980 (OECD, 2010).

Los países centrales (desarrollados) suelen reportar altísimas pérdidas debido a la ocurrencia de extremos climáticos, colocándose como los principales afectados. Sin embargo estas pérdidas radican generalmente en el terreno de lo económico, donde los países en vías de desarrollo no compiten por su infraestructura y calidad de bienes. Son estos países de economías pobres quienes sufren las mayores pérdidas en vidas humanas (IPCC, 2014).

Resalta la evidencia entre sobreponerse y adaptarse (Sánchez, 2013b). A la capacidad de ajustarse a los cambios se le conoce como adaptación. Existen en la actualidad ciudades funcionales que prueban cómo habitantes, empresas y gobiernos en conjunto logran una infraestructura para hacer frente a episodios climáticos extremos, logrando mantener el funcionamiento de los servicios y los suministros básicos.

Ciudades europeas a partir de la ola de calor del año 2003, y en espera de un incremento en la frecuencia de episodios cálidos, generalizaron medidas para paliar los efectos de las altas temperaturas. Las autoridades nacionales, regionales y locales, pusieron en funcionamiento sistemas de alerta en un intento de evitar una excesiva mortalidad durante los episodios cálidos (Fernández y Rasilla, 2009). Las autoridades desarrollaron los programas necesarios para que el desastre ocurrido en 2003, con miles de víctimas como desenlace, no se vuelva a repetir. A través de medidas estructurales, comenzaron a adaptarse para el futuro. Apenas dos años después, tuvieron la oportunidad de decretar un nivel de alerta máxima ante un nuevo embate de elevadas temperaturas. El menor número de muertes ha reflejado el éxito de la necesaria capacidad adaptativa.

Las ciudades han de tratarse como espacios modificados cuyo desempeño depende de una adecuada planeación y, por supuesto, adaptación al clima. Hasta hace unos años, un rompimiento con la naturaleza era símbolo de superioridad sobre ella, la ruptura de la dinámica natural por la acción antrópica se ha saldado, casi siempre, con el desarrollo de una catástrofe (Ayala-Olcina, 2002). Las ciudades, inmersas en un medio con características geográficas propias de una región, se constituyen, sin embargo, como entidades diferentes. El cambio en el uso del suelo ha propiciado la formación de un ambiente cuyas características no sólo incluyen una cubierta artificial, sino las consecuencias ambientales de su establecimiento.

1.2.1 Aspectos de los peligros climáticos urbanos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México se encuentra expuesta a múltiples amenazas naturales, entre ellas, la ocurrencia de sismos, inundaciones (pluviales) y procesos de remoción en masa. Estos últimos suelen concatenarse por ocurrencia de precipitaciones tanto extremas como no extremas. Las inundaciones (y los efectos que conllevan) son el desastre más recurrente que afecta esta urbe densamente poblada, al igual que la mayor parte de los desastres en el mundo.

Las precipitaciones intensas (y las consecuentes inundaciones) han tenido un largo historial. Es bien conocido que desde la formación de la ciudad, los antiguos habitantes padecían el desbordamiento de los lagos, situación que se repitió durante la época colonial hasta su desecación casi total.

Si bien el régimen de lluvias responde a los mismos sistemas de macroescala, la precipitación no es igual en toda el área metropolitana, tanto las zonas que registran alta

precipitación promedio (poniente) como las de bajo (una tercera parte de las más lluviosas) sufren los efectos de episodios extremos.

Actualmente, en la Ciudad de México, no existen, según la GPIAE (Gerencia de Protección a la Infraestructura y Atención de Emergencias) corrientes que causen daños por desbordamientos. Además, expertos en infraestructura hidráulica, según un artículo de La Jornada (13 de julio del 2007), consideran que la ciudad de México estará sujeta a inundaciones locales, pero será difícil que ocurra un gran desastre a causa del estado del drenaje profundo, como ha señalado el gobierno federal.

El sistema de drenaje es rebasado frecuentemente, resultando en una incapacidad de desalojar el agua precipitada, según reportan notas hemerográficas y no oficiales (La Razón, 2012; Milenio, 2014), agregando además que el terreno sufre reajustes debido a las características del subsuelo, lo que causa daños en su estructura, según el titular de la Comisión Nacional del Agua (El Universal, 2010). Esta acumulación de agua (de aguas negras), acarrea problemas de salud a la población afectada. Las lluvias al ser intensas o prolongadas, ocasionan procesos de remoción y derrumbes en los cerros habitados por tantas colonias con asentamientos irregulares (Conde *et al.*, 2013), como en la delegación Álvaro Obregón, con 28 deslizamientos de tierra, o Cuajimalpa con 22 en el periodo 1970-2003 según datos de DESINVENTAR, el cual es un sistema georreferenciado de registro de eventos de desastre para la elaboración de bases de datos nacionales en América Latina y el Caribe (<http://www.desinventar.org/>).

Además, hay que agregar a los desastres provocados por las lluvias, la caída de anuncios espectaculares y árboles los cuales arrastran los cables de energía causando apagones y caos generalizado, como lo reporta el periódico Excelsior (2015a, 2015b, 2015c) o la cadena de noticias CNN (2015),

Por otra parte, en la Ciudad de México, la ocurrencia de temperaturas cálidas se ha presentado con mayor frecuencia desde mediados del siglo pasado (Jáuregui, 2009), correspondiendo con el crecimiento acelerado de la ciudad y con el incremento térmico a nivel global. Tanto los principales efectos de la precipitación como de la temperatura en la ZMCM se presentan en el capítulo 4 de este trabajo de investigación.

Ante estas perspectivas de modificaciones en el comportamiento de las variables climáticas en la ZMCM, la ciudad, en la parte correspondiente al Distrito Federal creó el Programa de Acción Climática 2008-2012 con 24 medidas de mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero y 12 medidas para la adaptación al cambio climático. El programa sólo asigna un 6% a la adaptación y el 94% a la mitigación (Sánchez-

Rodríguez, 2013a) lo cual resulta en un desequilibrio en una ciudad a la que le urge adaptarse, y en un país que no es de los mayores emisores de gases de efecto invernadero en el mundo.

La Ley de Protección Civil en el Distrito Federal (Asamblea Legislativa del Distrito Federal, ALDF, 2002), señala específicamente que cada delegación deberá establecer un sistema de protección civil con el objetivo de organizar respuestas inmediatas ante situaciones de emergencia, la cual se organizará de acuerdo con la ley orgánica de cada delegación. Señala también que tendrá como obligación estudiar las formas de prevenir siniestros y desastres y reducir sus efectos en cada una de las localidades afectadas; tendrá la obligación de desarrollar sus propios programas con base en el programa estatal; y deberán estar integrados por los altos representantes locales, grupos voluntarios y los sectores sociales y privados. Se señala la tarea de establecer los organismos y mecanismos que promuevan y aseguren la capacidad de la comunidad, especialmente a través de la formación de voluntarios de protección civil; promover la cultura de la protección civil organizando y desarrollando acciones educativas y capacitando a la sociedad, en coordinación con las autoridades en la materia (www.pgjdf.gob.mx) (Luyando *et al.*, 2014).

A nivel nacional, ante la deficiente respuesta oficial en los sismos del año 1985, lo cual dejó en evidencia las necesidades institucionales de mejorar las estrategias encaminadas a la prevención y atención de desastres, se creó el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) por decreto presidencial en el año 1986. Como una dependencia coordinada para la Secretaría de Gobernación, se garantizaba la mejor planeación, seguridad, auxilio y rehabilitación de la población y de su entorno ante una situación de desastre.

Por decreto presidencial, también se creó el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) en 1988 para llevar a cabo las tareas de investigación en torno a riesgos y desastres; el Consejo Nacional de Protección Civil en 1990, como instancia consultiva y de coordinación, con la intención de incluir una mayor participación social, tanto en la formulación de programas como en la ejecución de los mismos; y el Fondo Nacional de Desastres Naturales (FONDEN) en 1996 para apoyar económicamente a las entidades rebasadas por el desastre. El SINAPROC planteó la necesidad de que cada estado y, posteriormente, cada municipio, crearan su propio sistema de protección civil, a semejanza del nacional, pero con énfasis en las características específicas de riesgo de cada estado y municipio.

La protección civil en México, como se ve, es de reciente creación. Toscana *et al.* (2008) y Campos *et al.* (2007) aclaran que no hay todavía recursos económicos suficientes

destinados para una implementación de acciones preventivas. En la actualidad, los programas, en su mayoría, se enfocan más en acciones correctivas. Es necesaria la búsqueda de nuevos enfoques de acuerdo a las nuevas necesidades de la sociedad a través de la planificación urbana (Sánchez-Rodríguez, 2013b).

En su condición de megaciudad de acelerado crecimiento, la ZMCM es un espacio drásticamente modificado, la cual contiene a una población que se atiene a un clima cambiante, el cual afecta mayormente a la población más desfavorecida. El impacto que ocasionan los extremos de precipitación y temperatura, exagera la compleja dinámica y funcionamiento de una de las ciudades más grandes del mundo.

2. La Zona Metropolitana de la Ciudad de México

El presente capítulo muestra el desarrollo histórico de la ciudad de manera que se conozca el origen y formación de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) y las características de su crecimiento y evolución. Esto tiene como fin dar un sustento espacial y temporal a las propuestas de los capítulos posteriores que requieren del conocimiento del sitio como un modificador del ambiente. La población que en ella habita enfrenta, según la forma en que se haya asentado en la enorme extensión urbana, las condiciones de un clima variable y cambiante.

2.1 Características físicas de la zona de asentamiento

La ZMCM crece y se desarrolla a una altitud de 2,240 msnm (en el centro histórico de la ciudad), condición poco común en una capital ubicada en pleno trópico, y se asienta en el centro y suroeste de la Cuenca del Valle de México, una cuenca lacustre de aproximadamente 9,600 km² (entre los paralelos 19°01'18" y 20°09'12" latitud norte y entre los meridianos 98°31'58" y 99°30'12" longitud oeste) (Fig. 5).



Fig. 5. Ubicación geográfica de la ZMCM en la Cuenca del Valle de México. Fuente: Google earth, 2015.

Esta cuenca se sitúa en la Provincia de los Lagos y Volcanes de Anáhuac del Sistema Volcánico Transversal. Al oeste se localizan las sierras de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo. Hacia el norte se encuentra limitada por las serranías de Tezontlalpan, Tepetzotlán y Pachuca. Al oriente se levanta la Sierra Nevada cuyos máximos exponentes son los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl con 5,465 y 5,286 metros de altitud, respectivamente (Aguilar, 2000).

La ZMCM goza de un clima suave, templado por la altura y con lluvias en verano (propio de algunos regímenes tropicales). La temperatura máxima promedio se presenta en los meses de abril o mayo (26.8°C) con una máxima extrema de 33.9°C (el 9 de mayo de 1998) en las dos últimas décadas del siglo XX. La mínima extrema, para el mismo periodo, ha sido de -0.4°C, y la mínima promedio de 7.4°C en el mes de enero. Seis meses de lluvia y seis de sequía, con el mes más lluvioso en julio (189 mm promedio) y el más seco en febrero (7 mm promedio), un total anual promedio de 846 mm.

El sistema lacustre del fondo de la cuenca cubría, antes de los asentamientos humanos, aproximadamente 1500 km², y estaba formado por cinco lagos someros: Tzompanco, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco (Fig. 6). Texcoco era el lago al que concurrían las aguas de los otros lagos más elevados, y era ahí donde se acumulaba el agua de la cuenca antes de evaporarse (Ezcurra, 2003).



Fig. 6. La cuenca de México en 1519. Fuente: “La Cuenca de México Ayer y Hoy”, Arqueología Mexicana, núm. 86, 2007.

El subsuelo donde se encuentra asentada la ciudad corresponde a una secuencia estratigráfica de relleno aluvio-fluvio-lacustre y volcánico. La profundidad de estos estratos abarcan hasta 200 m, de los cuales se pueden distinguir principalmente tres (Mooser, 2000):

- 0 a 30 m – Lacustre superior: depósitos arcillosos lacustres
- 35 a 45 m – Lacustre inferior: depósitos arcillosos lacustres
- 45 m en adelante – Depósitos profundos: arenas y gravas fluvio-aluviales.

Los suelos en la cuenca de México son jóvenes, de incipiente desarrollo ya que la edad de los materiales volcánicos y el clima determinan que haya habido poca alteración física (Cervantes y Alfaro, 2000). El principal tipo de suelo en la zona del valle corresponde al Feozem.

La vegetación y la fauna original eran variados, dadas las características del suelo, del régimen climático y la altitud de la cuenca. Había, entre otros, pastizales en los suelos aluviales someros, huizaches en las pendientes secas del norte, encinos en diferentes especies en los suelos aluviales elevados, en el piedemonte bajo, piedemonte medio y piedemonte superior. Además de la vegetación que todavía se conserva sobre los 2,700 m de altitud con pinos, oyameles y enebros (Melo y Alfaro, 2000), en la actualidad profundamente modificada. Con los asentamientos humanos, se fue destruyendo la flora original, de la cual quedan sólo relictos, y dio paso a nuevos tipos de vegetación, cultivos agrícolas y, por supuesto, una superficie urbana con mínimas áreas verdes.

En sus orígenes, la Ciudad de México fue erigida, si bien de una forma no del todo sustentable, en una mayor coexistencia pacífica con el medio. Sus pobladores lograron una adaptación que implicó la modificación de ecosistemas y el impacto en el medio al demandar alimentos, agua y otros requerimientos que obtuvieron de la explotación de la naturaleza. En algunas zonas, como en Teotihuacán, al parecer la desmedida explotación de los bosques, la modificación de cuerpos de agua y la tala de grandes extensiones con motivo de obtener superficies cultivables y para el establecimiento de asentamientos humanos, contribuyeron al desequilibrio y posterior caída de la cultura teotihuacana (Calderón, 2010).

2.2 Evolución de la Ciudad de México

La transformación que ha sufrido la ciudad a lo largo de los siglos, desde su fundación en el siglo XIV (con una extensión de 15 km²; Lombardo, 2000) hasta los actuales 7,800 km² (CONAPO, 2010a) conjuga componentes históricos, económicos y demográficos sobre un área que durante un largo periodo ha gozado de un importante dinamismo económico y poblacional.

En 1428 dio principio el Imperio Mexica, donde cada uno de los nueve monarcas que tuvo procuraron engrandecerla y pretendieron hacer de su ciudad la más bella, por lo que llega a tener, tiempo después, un equilibrio entre construcciones y espacios verdes muy poco común (Lombardo, 1972). A casi 200 años de fundada la ciudad de Tenochtitlán, los mexicanos enfrentan la llegada de los españoles. Este hecho dio un resultado funesto por la destrucción casi total de la ciudad. Los primeros cambios realizados consistieron en cegar algunos canales destruyendo el sistema de drenaje de la gran Tenochtitlán.

Posteriormente, entre diciembre de 1521 y enero de 1522, dio principio la construcción de la nueva ciudad. Las construcciones entonces eran fornidas y toscas, macizas rejas de

hierro las resguardaban, al igual que fuertes torres que las hacían parecer fortalezas (Espinoza, 1991). Durante algunos años, los lagos no pudieron contener la enorme cantidad de agua que, rebasando su nivel normal, inundaba la ciudad. En 1605 se ordenó la reparación y limpieza de los diques y canales de todo el valle. Al término del siglo XVII, la ciudad ya había adquirido notoria importancia, no sólo como cabeza de la Nueva España, sino por su población que llegaba a los cien mil habitantes, sin contar con la población flotante de los pueblos vecinos.



Fig. 7. Vista de la Ciudad de México en el año 1628. Fuente: Plano de Juan Gómez de Trasmonte.

Llanas (1997) narra los primeros asentamientos, desde la configuración del señorío azteca hasta la caída de Iturbide y su idea de imperio. Desde entonces, pero sobre todo desde la caída de Tenochtitlán, la urbe prehispánica comenzó a sufrir las primeras grandes alteraciones que no se detendrían ya más.

En años posteriores a la conquista, los nuevos pobladores quisieron hacer de Tenochtitlán un sitio a imagen y semejanza de las ciudades europeas, ignorando las condiciones propias del lugar que ahora habitaban. Comenzó, desde entonces, la tenaz y persistente debacle de esta región que se considera una de las más devastadas ecológicamente en el mundo (Ezcurra, 2003). La desaparición de los lagos, en una decisión desacertada debido a la severa inundación en septiembre de 1629 (Mauleón, 2015), promovió el crecimiento de la ciudad donde nunca debió haberse asentado. Sin embargo, la situación de la población ante las inundaciones y el apremio por las condiciones sanitarias tuvieron un gran peso. La severa transformación de la cuenca tuvo lugar con la progresiva desecación de los lagos, originada por la terminación de la gran obra del paso de Nochistongo y, posteriormente, por las obras de las desviaciones de los ríos.

La descripción histórica entre conquistadores, virreyes, Ayuntamientos y demás administraciones predisponen a la casi solitaria conclusión de que este espacio era conducido a lo que conocemos hoy como ciudad. Eso a pesar de los planes y trazas que a lo largo de los años pretendieron llevar al orden y al concierto a la que seguía siendo la ciudad con mayor atracción e importancia del país.

Al término del siglo XIX, la ciudad alcanzó una extensión de 8.5 km² aproximadamente, con una población de 367,446 habitantes (Espinoza, 1991). Teodoro González de León (2007) abrevia la historia de la urbe de aquellos años considerando que se llegó a un equilibrio con el difícil entorno lacustre hasta que comenzó la desecación de los lagos y hubo entonces espacio suficiente para proyectos de crecimiento. La ciudad colonial se caracterizó, dice, por tener un urbanismo y una arquitectura muy sólidos: era una ciudad muy delicada, con un sistema de plazas que va de lo pequeño a lo grande, un urbanismo, en fin, hecho a base del espacio público. Esto duró aproximadamente hasta el periodo histórico de la Reforma, a mediados del siglo XIX, pues décadas después el periodo revolucionario oscureció las perspectivas de crecimiento ordenado de la ciudad. La recuperación por el espacio público, a pequeña escala, se recobró hasta la década de los cuarenta del siglo XX (González de León, 2007).

En el inicio del periodo revolucionario, en 1910, la ciudad tenía ya 9.62 km² de área urbana, creciendo 1.12 km² más que en 1900. La tendencia de crecimiento en ese entonces se dio principalmente hacia el poniente y suroeste y en menor medida hacia el norte (Fig. 8). La parte oriental siguió prácticamente sin desarrollo debido a lo difícil del terreno y a ser más susceptible de sufrir inundaciones. Queda claro que fueron los terrenos disponibles para los asentamientos posteriores de la población de escasos recursos. En los años cuarenta se acentúan los cambios en la zona central de la ciudad, se construyeron edificios modernos que dejaron atrás las disposiciones que en un inicio impedían la construcción de inmuebles de más de 22 metros de altura que determinó la Dirección General de Obras Públicas en el boletín oficial, febrero 28 de 1905 (Espinoza, 1991).

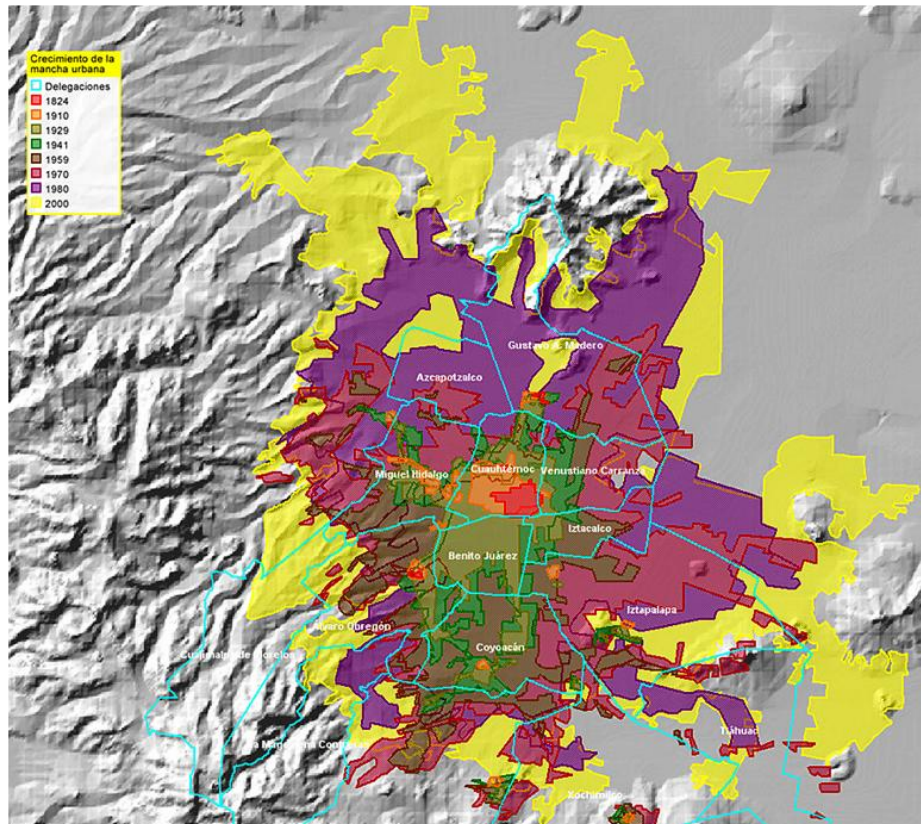


Fig. 8. Crecimiento de la superficie urbanizada en la ahora Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Fuente: <http://www.centrogeo.org.mx/geocm/GeoTexto/030101.htm>

En 1959 la ciudad llega a tener 115 km² de área urbana, con un incremento del 27.5% en relación a 1950. Comienza ya el crecimiento explosivo, principalmente hacia el sur. Es en los años setenta en que el crecimiento urbano del Distrito Federal y del área conurbada del Estado de México se extendió en todas direcciones. Las políticas respecto al crecimiento demográfico en esos años se quedaron cortas y no se previó una expansión tal que los planes de desarrollo funcionaran y fuesen coherentes con la realidad. Ernesto P. Uruchurtu, regente en esa época al mando de las decisiones en la ciudad, pretendió frenar el crecimiento con un decreto (González de León, 2007) ocasionando que la urbanización se extendiera hacia los municipios del Estado de México en vez de encauzarla de acuerdo a las necesidades de la población, promoviendo los espacios y el transporte público en vez de facilidades para una ciudad de automovilistas, al estilo estadounidense.

En 1980, sólo el Distrito Federal contaba con 8,831,079 habitantes, alcanzando una densidad de 5,876 habitantes por kilómetro cuadrado. Para 1991, la superficie urbanizada

alcanza los 1,328 km² (Espinoza, 1991). Los estragos sobre el medio eran ya devastadores. El crecimiento ha sido caótico, la población no ha adquirido una cultura ecológica de respeto por las áreas verdes. Éstas carecen de un orden y se muestran de variados tamaños en toda la extensión de la ciudad, la mayor parte de ellas se encuentran deterioradas y los árboles enfermos y en mal estado. La parte más deficientemente dotada de la metrópoli se encuentra al oriente y suroriente, en suelos salinos y llanuras áridas donde los vientos arrastraban el polvo en tolveneras gigantescas sobre el resto de la ciudad (Jáuregui, 1989).

Actualmente, la ZMCM se extiende sobre 16 delegaciones del D.F., 59 municipios del Estado de México y 1 municipio del estado de Hidalgo, en una superficie de 7,866 km² y con una población de más de 20 millones de habitantes (CONAPO, 2010a). La mayor parte de los municipios que fueron alcanzados por la ciudad original (D.F.) se encuentran conurbados físicamente, es decir, en una continuidad ininterrumpida de la superficie urbanizada (Fig. 9). El cuadro 4 muestra el crecimiento de cada municipio o delegación de 1990 al 2010 y cómo se encuentra conurbado.

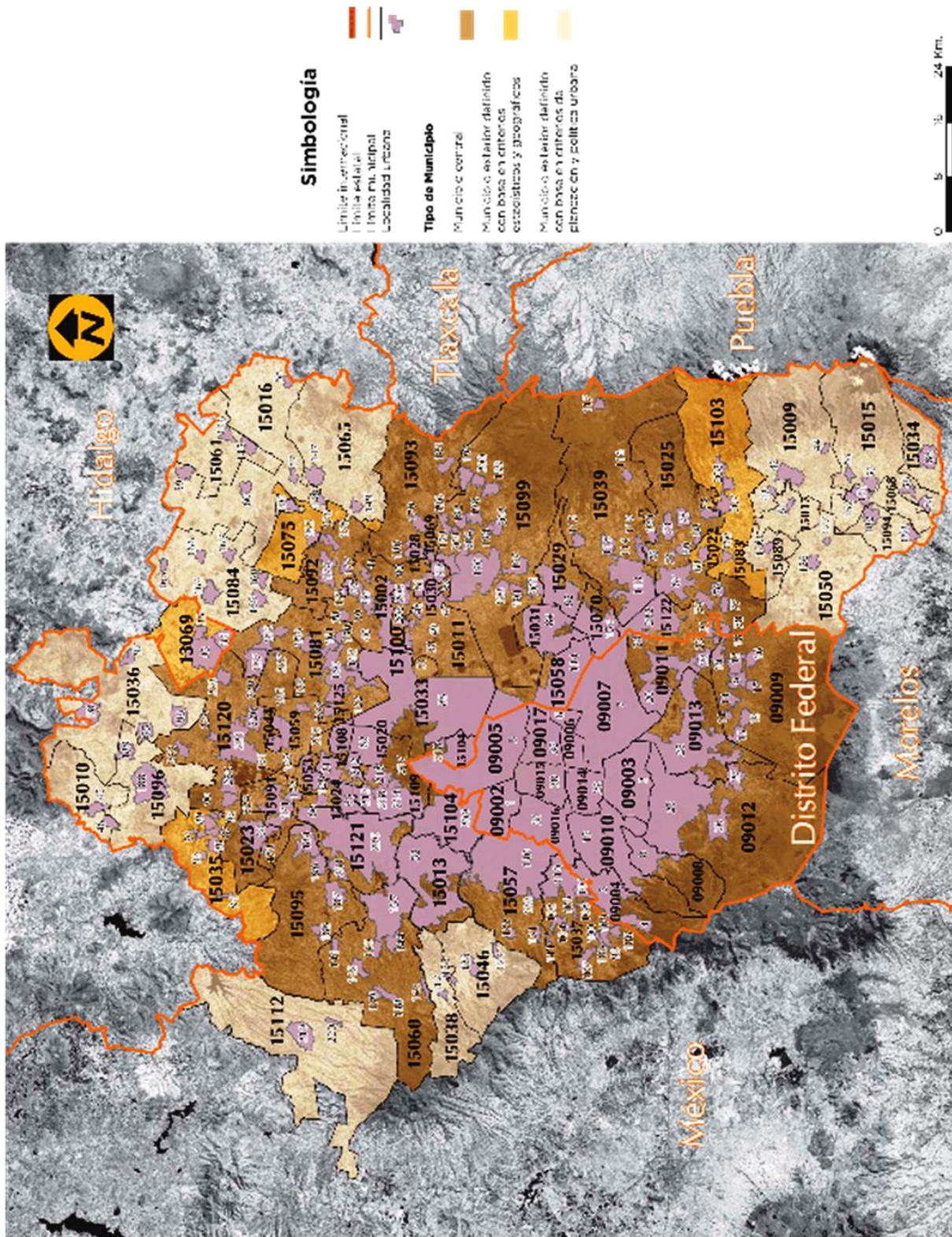


Fig. 9. Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Ubicación de los municipios que la conforman. http://siieh.hidalgo.gob.mx/zona_metropolitana_del_valle_de_mexico.html

Cuadro 4. Municipios que conforman la ZMCM. Clave 09 corresponden al Distrito Federal, clave 15 al Estado de México y clave 13 al estado de Hidalgo. CONAPO http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Zonas_metropolitanas_2010

Población:

Clave	Municipio	1990	2000	2010	Conurbado físicamente
09002	Azcapotzalco	474 688	441 008	414 711	•
09003	Coyoacán	640 066	640 423	620 416	•
09004	Cuajimalpa de Morelos	119 669	151 222	186 391	•
09005	Gustavo A. Madero	1 268 068	1 235 542	1 185 772	•
09006	Iztacalco	448 322	411 321	384 326	•
09007	Iztapalapa	1 490 499	1 773 343	1 815 786	•
09008	La Magdalena Contreras	195 041	222 050	239 086	•
09009	Milpa Alta	63 654	96 773	130 582	•
09010	Álvaro Obregón	642 753	687 020	727 034	•
09011	Tláhuac	206 700	302 790	360 265	•
09012	Tlalpan	484 866	581 781	650 567	•
09013	Xochimilco	271 151	369 787	415 007	•
09014	Benito Juárez	407 811	360 478	385 439	•
09015	Cuauhtémoc	595 960	516 255	531 831	•
09016	Miguel Hidalgo	406 868	352 640	372 889	•
09017	Venustiano Carranza	519 628	462 806	430 978	•
13069	Tizayuca	30 293	46 344	97 461	
15002	Acolman	43 276	61 250	136 558	•
15009	Amecameca	36 321	45 255	48 421	
15010	Apaxco	18 500	23 734	27 521	
15011	Atenco	21 219	34 435	56 243	•
15013	Atizapán de Zaragoza	315 192	467 886	489 937	•
15015	Atlautla	18 993	25 950	27 663	
15016	Axapusco	15 803	20 516	25 559	
15017	Ayapango	4 239	5 947	8 864	
15020	Coacalco de Berriozábal	152 082	252 555	278 064	•
15022	Cocotitlán	8 068	10 205	12 142	
15023	Coyotepec	24 451	35 358	39 030	•
15024	Cuautitlán	48 858	75 836	140 059	•
15025	Chalco	282 940	217 972	310 130	•
15028	Chiautla	14 764	19 620	26 191	•
15029	Chicoloapan	57 306	77 579	175 053	•
15030	Chiconcuac	14 179	17 972	22 819	•
15031	Chimalhuacán	242 317	490 772	614 453	•
15033	Ecatepec de Morelos	1 218 135	1 622 697	1 656 107	•

15034	Ecatzingo	5 808	7 916	9 369	
15035	Huehuetoca	25 529	38 458	100 023	
15036	Hueypoxtla	26 189	33 343	39 864	
15037	Huixquilucan	131 926	193 468	242 167	•
15038	Isidro Fabela	5 190	8 168	10 308	
15039	Ixtapaluca	137 357	297 570	467 361	•
15044	Jaltenco	22 803	31 629	26 328	•
15046	Jilotzingo	9 011	15 086	17 970	
15050	Juchitepec	14 270	18 968	23 497	
15053	Melchor Ocampo	26 154	37 716	50 240	•
15057	Naucalpan de Juárez	786 551	858 711	833 779	•
15058	Nezahualcóyotl	1 256 115	1 225 972	1 110 565	•
15059	Nextlalpan	10 840	19 532	34 374	•
15060	Nicolás Romero	184 134	269 546	366 602	•
15061	Nopaltepec	5 234	7 512	8 895	
15065	Otumba	21 834	29 097	34 232	
15068	Ozumba	18 052	23 592	27 207	
15069	Papalotla	2 387	3 469	4 147	•
15070	La Paz	134 782	212 694	253 845	•
15075	San Martín de las Pirámides	13 563	19 694	24 851	
15081	Tecámac	123 218	172 813	364 579	•
15083	Temamatla	5 366	8 840	11 206	
15084	Temascalapa	19 099	29 307	35 987	
15089	Tenango del Aire	6 207	8 486	10 578	
15091	Teoloyucan	41 964	66 556	63 115	•
15092	Teotihuacán	30 486	44 653	53 010	•
15093	Tepetlaoxtoc	16 120	22 729	27 944	•
15094	Tepetlixpa	12 687	16 863	18 327	
15095	Tepotztlán	39 647	62 280	88 559	•
15096	Tequixquiac	20 784	28 067	33 907	
15099	Texcoco	140 368	204 102	235 151	•
15100	Tezoyuca	12 416	18 852	35 199	•
15103	Tlalmanalco	32 984	42 507	46 130	
15104	Tlalnepantla de Baz	702 807	721 415	664 225	•
15108	Tultepec	47 323	93 277	91 808	•
15109	Tultitlán	246 464	432 141	524 074	•
15112	Villa del Carbón	27 283	37 993	44 881	
15120	Zumpango	71 413	99 774	159 647	•
15121	Cuautitlán Izcalli	326 750	453 298	511 675	•
15122	Valle de Chalco Solidaridad	n.a.	323 461	357 645	•

15125	Tonanitla	n.a.	n.a.	10 216	•
	Zona Metropolitana	15 563 795	18 396 677	20 116 842	

La manutención de una ciudad dependiente en su abastecimiento de los insumos necesarios para su sobrevivencia diaria, causando severo deterioro ambiental y costo en el resto del país, la convierte en la ciudad del eterno subsidio (Ezcurra y Sarukhán, 1990). El crecimiento físico, estimado a partir de fotografías aéreas entre 1953 y 1980 es mayor, aunque ligeramente, al crecimiento de la población. Esto puede conducir a pensar que la ciudad se extiende con una menor presión en cuanto a la densidad de las edificaciones, dando lugar a la conservación y creación de áreas verdes. Nada más alejado de la realidad, el crecimiento es heterogéneo (según el nivel de ingreso de quien vaya a habitar los espacios) y no se considera, por lo tanto, que las áreas vegetadas sean una prioridad en los asentamientos. Un área proletaria difícilmente dedicará un espacio abierto a otra cosa que no sea una casa o un establecimiento comercial. Ezcurra y Sarukhán (1990) agregan, además, que la condición alarmante de la atmósfera urbana y la contaminación, añade peligro a la ya difícil situación de la ciudad en su inestable emplazamiento, escasez de agua, tamaño y población descomunal.

La superficie urbanizada de la zona metropolitana, que rebasaba ya en 1960 los límites del Distrito Federal, constituye un reto a la coordinación entre dos autoridades político administrativas. El crecimiento de esta gran aglomeración, abarcando áreas agrícolas o inadecuadas para la urbanización, es resultado también de la imposibilidad de construir desarrollos verticales que impidan la pérdida de zonas que debieran ser conservadas, siendo la mayor parte población proletaria, de escasos recursos, con la única posibilidad de habitar en asentamientos irregulares. Se construyeron casas habitación de bajísima calidad, infraestructura que se volvió obsoleta a corto plazo (Bataillón y Aceves, 1968). A estas zonas proletarias llegan, además de los migrantes, los habitantes que abandonan zonas urbanas que sufren deterioro constante, que se degradan y desvalorizan, como las áreas centrales de la ciudad (Pradilla, 2005).

2.3 Crecimiento de la cubierta urbana: zona urbana y periurbana

Las ciudades, signo y emblema de la civilización, poseen todas las características necesarias indicativas del nivel de bienestar que pueden tener las sociedades. Su historia y funcionalidad son una de las muestras más evidentes del desarrollo de un país. Son polos de atracción y de expulsión, concentran enormes cantidades de bienes en un espacio reducido, son modificadoras del ambiente hasta sus últimas consecuencias.

La tendencia de la población a vivir y desarrollarse en medios urbanos responde, en el caso de países en vías de desarrollo, a razones de supervivencia. La desigual situación entre las poblaciones rurales y urbanas marca los flujos migratorios que se dirigen hacia ciudades grandes o pequeñas, con la seguridad de encontrar mejores oportunidades de trabajo, de servicios y de infraestructura en general. Esta tendencia, acentuada en América Latina, ha llevado a un crecimiento desmedido de la población urbana, alcanzando en México un 75% (Vieyra, 2009). El abandono de las comunidades rurales implica una modificación en los límites de las ciudades receptoras, y por lo tanto una presión sobre el uso de suelo. Se pierden áreas de cultivo y naturales, lo que conlleva a la pérdida también de zonas de recarga del acuífero.

El crecimiento de la población en las últimas dos décadas ha sido de 1.7% medio anual en la década 1990-2000 y de 0.9% de 2000 a 2010, extendiéndose en una superficie de 7,866.1 km (CONAPO, 2010a). Sin embargo, y a pesar de los asentamientos irregulares y la contaminación intensa que generan, más del 50% del territorio del D.F. es suelo de conservación (Aguilar, 2009).

Estudios y descripciones del mundo antiguo colocan a la Ciudad de México como un sitio menos importante de lo que es ahora, su crecimiento y el de su zona conurbada es un fenómeno reciente, ubicado a partir de 1940 (Kumate y Mazari, 1990) y con un fuerte crecimiento demográfico en los años sesenta. Es verdad que la población siempre ha sido mayor en esta zona que en el resto de la República, por lo que el desarrollo de la industria y los servicios se encaminó a satisfacer las necesidades de los habitantes de la región. Esta conclusión, simple a más no poder, en realidad engloba procesos históricos multicausales (Delgado *et al.*, 2008) que han dado como resultado la ciudad, la región que ahora tenemos: un sitio que se desborda, un lugar de enormes contrastes socioeconómicos y funcionales, una región con una falta de gobernabilidad por la casi inexistente comunicación entre gobernados y gobernantes (Satterthwaite *et al.*, 2009), un lugar severamente afectado en su ambiente.

La investigación profunda acerca de la urbanización en México ha ido cobrando fuerza en los últimos años, al igual que en el resto del mundo (Aguilar, 2006). Crecer desordenadamente y con una infinidad de necesidades deficientemente resueltas es razón suficiente para la publicación de cada vez un mayor número de trabajos dedicados a este tema que, cuando menos en la década de los cincuenta hasta mediados de los setenta, eran inexistentes (Bataillon, 2008).

La ZMCM se considera zona metropolitana porque cumple con las características necesarias de un mínimo de dos municipios o unidades administrativas (pueden ser estados) donde existen relaciones estrechas a pesar de que no necesariamente coincidan en los planes de crecimiento y desarrollo. El rápido crecimiento de la población ha dado origen a formaciones, a modelos de configuración urbana que, dadas las características, dificultan el establecimiento de una clara clasificación. No se puede, muchas veces, definir si pertenecen a una categoría urbana o rural. Esto da la apariencia, entonces, de manchas dispersas que a su vez pueden conformar regiones, un movimiento “fuera del centro” hacia una franja formada por el espacio ex urbano (Delgado *et al.*, 2008).

Aguilar (2006), establece que la Ciudad de México puede responder a un modelo centro-periferia policéntrica, esto es, se presenta una gran aglomeración a la vez que se manifiestan formas de crecimiento urbano disperso, donde también se desarrolla un modelo de crecimiento policéntrico. El policentrismo, como su nombre lo indica, se refiere a la existencia de varios centros en una región determinada. Es decir, hay un crecimiento urbano disperso a partir de una gran aglomeración con una discontinuidad y bajas densidades conforme se aleja de ella, lo que da lugar a la urbanización de espacios rurales intermedios en la distancia a otras ciudades de menor tamaño, lo que lleva a la formación de extensas ciudades-región policéntricas (Aguilar, 2006).

El mismo autor establece un aspecto importante para la formación de una región policéntrica, y es que las ciudades estén separadas por una proximidad razonable (de media hora hasta una hora de viaje por carretera) lo cual lleva a un mejor flujo de los mercados laborales, siendo el criterio más usado para establecer la interacción funcional entre núcleos de población. Estos vínculos son, por demás, complejos, y los conceptos que hacen referencia a estas vastas regiones pretenden explicar el alcance real de lo urbano.

Este crecimiento de la periferia y de las ciudades medias y pequeñas de la región, este policentrismo, no se debe únicamente a la migración proveniente de sitios más lejanos, sino a la desconcentración de la actividad económica y por supuesto demográfica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. En las décadas entre 1970 y 2000, la gran aglomeración disminuyó su poder de atracción. Aguilar (1993, 2009) elabora sobre la reestructuración de la ciudad como una gran metrópolis que se desconcentra, donde las ciudades intermedias van cobrando importancia. Este decrecimiento se debe principalmente a la crisis económica de los años ochenta y al estímulo que sufrió la industria en las ciudades intermedias, dejando atrás el lugar preferido anteriormente.

Se puede describir el fenómeno en las ciudades centrales como: áreas periurbanas, periferia regional, ciudad región, entre otros para indicar este proceso de crecimiento urbano. Delgado *et al.* (2008) identifican tres contornos regionales alrededor de la ciudad de México: núcleo central, corona y periferia regional. Así es como también se habla de *urbanización difusa* al tratar de explicar las dificultades para determinar las zonas aledañas a la urbe propiamente dicha donde el espacio no está claramente urbanizado, tampoco es suburbano ni cumple con las características de un sitio rural.

Haciendo énfasis sobre los asentamientos en la periferia, que crecían abrumadoramente a mediados del siglo XX, Bataillon (1968) establece, de manera peculiar, los límites de la urbanización para tratar únicamente las zonas suburbanas, zonas que actualmente forman parte ya de las áreas densamente construidas, aunque no siempre debidamente asentadas. Define a estas colonias de “paracaidistas”, otro término urbanamente común, como ciudades perdidas donde, como se comentó en los trabajos citados anteriormente, no eran áreas urbanas ni tampoco rurales.

Muchas de ellas son poco apropiadas para el uso agrícola pero también para constituirse como urbanizaciones con toda la infraestructura necesaria, como serían los Pedregales (en el sur) al lidiar con un suelo hostil, el lecho del lago de Texcoco con las tormentas de polvo, etc. Estas zonas contaban con la poca iniciativa de sus habitantes quienes no fomentaban, al construir sus habitaciones absolutamente precarias, mejoras de ninguna especie dado el posible carácter provisional y transitorio por el sitio.

Además, la Ciudad de México ha padecido en las últimas décadas un deterioro generalizado, tanto en la calidad de vida como una acentuada afectación del medio (López-Blanco y Rodríguez-Gamiño, 2009). Tan sólo en la última década del siglo XX y principios del XXI, la cubierta urbanizada creció sobre zonas agrícolas y pastizales (que ya representaban una modificación anterior sobre bosques de coníferas) de 46 km² tanto en las porciones de planicie lacustre como en los piedemontes volcánicos en el sureste y suroeste de la zona metropolitana. Las zonas de bosque agregaron vegetación secundaria (3.4%), de bosque mixto a agricultura de temporal y riego un 2.9%, de bosque de coníferas a pastizal 2.8% del total de la superficie alterada (López-Blanco y Rodríguez-Gamiño, 2009).

No deja de ser, sin embargo, una región cuya ciudad central parece ser la de más peso, pero el proceso de relocalización ha llevado la actividad económica y el crecimiento demográfico a las ciudades alrededor y la periferia. La región central del país sigue teniendo una presencia importante en cuanto al total de población, con un 33%, aunque disminuye de 45 a 40% en cuanto a la población urbana (Sobrino, 2008).

A pesar de la importancia que los habitantes de la ciudad capital otorgamos a esta zona metropolitana, no se constituye como parte nodal del movimiento entre naciones. Ward (1990) hace de la ciudad un sitio que va de la maravilla de su creación y ubicación privilegiada, a la imposible e impensable perspectiva de habitarla de forma permanente. Incluso manifiesta la apreciación que se tiene del habitante capitalino en el resto del país, poco afortunada tantas veces, despreciado por su prepotencia y aires de grandeza, invasor de territorios que no le corresponden cuando migra a otras ciudades.

Sin demeritar la importancia de la que se considera la ciudad más grande del mundo, Ward deja bien claro que no se trata de una “ciudad mundial”, sino que es parte sólo de la periferia, no tiene poder, a pesar de sus dimensiones, no es un centro de control, ni siquiera en la semiperiferia tiene una importancia a nivel mundial, ni tampoco subregional pues en el aspecto financiero, económico, tecnológico no se encuentra entre las más importantes. A pesar de ser un estudio realizado en los años noventa, pareciera que esta serie de apreciaciones son aún vigentes.

El mismo autor se refiere a la Ciudad de México como la zona construida de manera contigua, por lo que no incluye a los municipios cuyas áreas urbanas no son continuas con la urbe principal. Por supuesto que no deshecha la idea de que en un futuro no muy lejano, estos municipios formarán una única extensión urbana. Aclara, al igual que muchos autores, que la definición de qué constituye la ciudad no es precisa. Es una única urbe gigantesca, a diferencia de Tokio-Yokohama o Nueva York-Nueva Jersey que son ahora una sola ciudad pero de la unión de dos separadas anteriormente de dimensiones considerables.

En los límites de la influencia de esta ciudad y sus complejos mecanismos, se encuentran otras, medias o pequeñas, con vínculos estrechos e intensos con las que establece relaciones funcionales. La cercanía con la Ciudad de México ha promovido su crecimiento, ellas mismas se han constituido a su vez en zonas metropolitanas, donde todas juntas suman aproximadamente 23 millones de habitantes en sólo apenas 23 mil km². Muchos millones en un área muy limitada. La Ciudad de México, por sí sola, concentra el 50 por ciento de todos los establecimientos industriales y el 70 por ciento de la fuerza de trabajo de toda la región, lo cual reafirma su enorme importancia económica y su gran poder concentrador (Aguilar, 2006).

El destino de los migrantes rurales, o de localidades menores, se ha orientado posteriormente a ciudades medias y no completamente a la ZMCM, aunque esta siga recibiendo el grueso de este movimiento, Delgado *et al.* (2008) y Aguilar (2006, 2009). Los

municipios conurbados tanto físicamente (en una continuidad de la superficie urbana ininterrumpida) como los no conurbados físicamente (Fig.9), serán los receptores de esta población migrante y que aunado a su crecimiento natural y a los habitantes de otras entidades del Estado de México fuera de la metrópolis, imprimirán una dinámica demográfica acelerada, contando también con el traslado a corta distancia de los residentes del Distrito Federal, lo que hará más extensa territorialmente a la zona metropolitana.

En la literatura se utilizan una variedad de términos para determinar el conjunto de ciudades que pueden estar o no unidas físicamente y que involucran aspectos no sólo espaciales y de extensión. Es importante hacer notar, entonces, que la conurbación es una condición que puede ser limitada para que una zona sea metropolitana, pero la interrelación, no necesariamente conurbada, es necesaria para la formación de una megalópolis (Delgado, 2003). Las redes que se establecen responden a la estructura de la actividad económica entre las ciudades y su entorno, lo cual es resultado de todo un proceso histórico. La actividad económica se desconcentra de la gran ciudad y se relocaliza en ciudades más pequeñas debido al desarrollo en las telecomunicaciones y en la infraestructura vial (Aguilar, 2006).

Es importante diferenciar un área conurbada de una aglomeración urbana. Se dice que un área conurbada es aquella que se compone de varias ciudades donde la continuidad espacial no es indispensable, donde cada una de estas ciudades posee una dinámica propia con un centro y una periferia y rasgos distintivos. La aglomeración urbana es la expansión de la ciudad hacia su periferia que puede afectar a pequeños núcleos de población que se ven absorbidos por el crecimiento urbano y que responden a la organización central, no tienen independencia funcional. El proceso de conurbación ha respondido al tipo de industrialización y comercio, por lo que es diferente en los países desarrollados y los que se encuentran en vías de desarrollo, como sería el caso de la ciudad de México y las zonas aledañas. Las delegaciones y los municipios que conforman la zona metropolitana pueden tener o no continuidad física y sin embargo estar conurbados (Delgado *et al.*, 2008).

Como se ha visto anteriormente, esta ciudad ha sido considerada como una conurbación del tipo subdesarrollado, correspondiente con un crecimiento urbano de escasa o ninguna planeación alrededor de un núcleo único.

Por zona metropolitana, CONAPO (2005) se refiere al conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan el límite del municipio que originalmente la contenía, incorporando

como parte de sí misma o de su área de influencia directa a municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica.

También se definen como zonas metropolitanas todos aquellos municipios que contienen una ciudad de un millón o más habitantes, así como aquellos con ciudades de 250 mil o más que comparten procesos de conurbación con ciudades de Estados Unidos de América. El INEGI considera un mínimo de 15 mil personas en un municipio para considerarlo urbano, sin embargo una población, una comunidad es considerada no rural cuando sobrepasa los 2500 habitantes.

Una metrópoli tiene continuidad física, aunque con limitantes. La Zona Metropolitana de la Ciudad de México no alcanzará una continuidad física tan fácilmente con las urbes circundantes (de no ser Pachuca o posiblemente Toluca), la presencia de cordilleras será siempre una limitante. Sin embargo, juntas todas ellas, la Ciudad de México (aun en su carácter de expulsora de población) y ciudades que la circundan, constituyen una región económica y demográficamente dinámica que concentra una gran cantidad de población y de bienes. Esta circunstancia, cuando menos en la ZMCM, profundiza el riesgo de desastres en un sitio que, como se mencionó anteriormente, está sujeto a la ocurrencia de fenómenos naturales cuya población (muchas veces en situación de vulnerabilidad) conoce, pero que no se encuentra debidamente adaptada. El riesgo de desastres que se asocian a episodios extremos del clima es una realidad en la Ciudad de México. El impacto que causará el cambio global del clima no deberá ser tratado como un problema a largo plazo.

2.4 Principales aspectos socioeconómicos de la población.

Claramente la ZMCM, como polo de atracción y gran concentrador de dependencias gubernamentales, industrias y servicios, se coloca, en el contexto de la República Mexicana, entre las ciudades con menores índices de marginación y con las mejores posibilidades de desarrollo.

Este desarrollo es relativamente reciente, su poder económico y crecimiento demográfico data apenas de 1940. La ZMCM se convirtió en el atractor y centro nodal de la economía a partir de la creación de la infraestructura de transporte, por lo que, además de su localización geográfica en la zona central del país, se comunicó a través de infraestructura vial, aérea y ferroviaria con todos los sitios importantes, como son los puertos y fronteras (Solís y Espinosa, 1990).

Muchos productos, alimenticios o no, son canalizados comercialmente a través de la capital. Esto continuó alentando la migración con mayor facilidad, lo cual condujo, por supuesto, a un poblamiento en condiciones de desigualdad, donde en la nueva urbanización se pueden identificar tres tipos de cambios de uso de suelo: en poblados tradicionales, en urbanización difusa de clase media y en asentamientos ilegales (Aguilar y Escamilla, 2009). Los asentamientos irregulares han cumplido diferentes funciones para la habitabilidad o el desenvolvimiento de la actividad productiva, se convierten en abastecedores de mano de obra y diversidad de productos para el núcleo urbano central (Santos, *et al.* 2009).

La dinámica demográfica indica que, de 1980 al 2000, la ZMCM creció a un ritmo inferior al resto del país (quien incrementó su población en ese periodo en 31.2 millones de habitantes, para un total de 98,157,304) debido a la polarización regresiva en los niveles de concentración, es decir, al crecimiento de otras áreas urbanizadas dentro de la zona central del país o bien en otros subsistemas como la frontera Norte y Sureste (Sobrino, 2008). Aun así, contribuyó con un aumento de 4.4 millones de habitantes, un menor crecimiento respecto al nacional, y que sin embargo, corresponde por sí solo al total de habitantes del área de Guadalajara, lo que proporcionalmente significa una enorme cantidad de población demandando servicios (agua, electricidad, salud, etc).

A este respecto, según información del XII Censo General de Población y Vivienda y el Conteo de Población 2005 (INEGI), con cálculos propios de López (2009), la cobertura de viviendas con agua entubada supera el 87% mientras que en drenaje supera el 96% en las delegaciones del D.F. A pesar del logro que esto significa, la infraestructura para la dotación del vital líquido significa tener la capacidad de primero obtenerlo para después distribuirlo, lo cual representa un severo problema para las autoridades responsables del suministro. En la misma situación se encuentra la provisión e infraestructura de energía eléctrica, cuya cobertura alcanza a casi la totalidad de la población. Ambas condiciones fueron, para el INEGI, casi únicas determinantes para ubicar a la ZMCM dentro de una baja marginalidad.

El análisis de la información censal respecto a los servicios de infraestructura hidráulica y de suministro eléctrico puede conducir a la idea de que las condiciones de habitabilidad en la ZMCM cubren los requerimientos de un ámbito urbano que se aproxima a lo saludable. Sin embargo, en una gran parte del conglomerado, la provisión de servicios como alumbrado público, pavimentación, seguridad, recolección de basura, señalización, vialidad, etc., distan en calidad con respecto a los servicios que se proveen en ciudades de países más desarrollados. Un foco que ilumina el interior de una vivienda hace una

gran diferencia a no contar con ninguno, por supuesto, de la misma manera el hecho de tener sólo una llave de agua dentro del predio (aunque fuera de la casa) acerca la civilización respecto a no contar con ninguna.

Sin embargo, la falta de categorización de los servicios de suministro de agua, drenaje y energía eléctrica en las bases de datos censales, impiden conocer si la toma de agua corresponde a un simple tubo en la entrada de una casa o si alimenta las llaves de siete baños distribuidos en tres pisos de una casa entre jardines. La carencia y el rezago se disimulan muy bien creando fácilmente una distancia ficticia que desaparece rápidamente con cualquier visita a zonas debidamente asentadas y a las que no lo están.

Como se mencionó anteriormente, la ZMCM ha sido calificada con un grado de marginación bajo (INEGI, 2005), o incluso muy bajo (CONAPO, 2010b) sobre todo si la categorización de la marginación social se realiza al interior de las fronteras nacionales, donde la falta de acceso a la educación, las viviendas inadecuadas, los insuficientes ingresos familiares de estados como Oaxaca, Guerrero y Chiapas también se contabilizan dentro de esas mismas fronteras, colocando a la ciudad de México y su área conurbada en el tope de un país con enormes desigualdades.

Otras evaluaciones, como la del CONEVAL, incluyen, para la medición de la pobreza, una serie de indicadores de carencia social como el rezago educativo, carencia por acceso a los servicios de salud, a la seguridad social, a la calidad y espacios en la vivienda, a los servicios básicos dentro de la vivienda y a la alimentación. Bajo estas condiciones, la situación de la ZMCM cambia sustancialmente. En 2010, vivían 875 mil personas en pobreza extrema, siendo Ecatepec, Nezahualcóyotl e Iztapalapa quienes han concentrado el mayor número de pobres. Estos municipios están dentro de los diez que aglomeran el mayor número de personas en esa situación de todo el país.

Resulta entonces, de primordial importancia la asociación que genera esta condición y la vulnerabilidad ante la ocurrencia de desastres.

La Ciudad de México fue, después de la conquista, la capital del virreinato y más adelante del país, pero sin el dominio económico que posteriormente la producción, el consumo y la circulación de mercancías le otorgó a mediados del siglo XX. Es de notar que ya para 1970, el PIB generado en la ZMCM representaba un 35.9 por ciento del PIB regional total en actividades industriales, y el 63.7 por ciento proveniente de los servicios. Para esas mismas fechas, el ingreso por habitante era el más alto del país, casi cinco veces el correspondiente al estado de Oaxaca y casi el doble del promedio nacional (Solís y Espinosa, 1990). Sin embargo, a finales de los años ochenta, resultado de la severa crisis

de principios de esa década, la superconcentración se derrumba a 34.4%, y continúa declinando la importancia manufacturera de la urbe a finales del siglo XX (Garza, 2000).

La industria, el comercio y los servicios, actividades principales de la población en la ciudad desde mediados de siglo, modifican su grado de participación en los últimos años de la década de los noventa, con un marcado proceso de concentración terciaria, descendiendo la actividad industrial y dando un mayor énfasis a los servicios.

La población de la ciudad resiente esta expansión y contracción de la economía y lo ve reflejado en el nivel y la distribución del ingreso. Mientras que en 1994 se alcanzó un 64.6% superior al nacional, en 1996 se reduce drásticamente a un 33.4%, afectando más a las clases medias que a las bajas dentro de una disminución del ingreso de forma generalizada (Garza, 2000).

Es así que el proceso de concentración y desconcentración económica (visto de una forma simplista), es crucial para conocer la evolución de la ZMCM y el alcance de su crecimiento en muchos aspectos.

Aun así, la ZMCM continúa siendo el actor principal dentro de la economía nacional, por lo que la dinámica migratoria, desde mediados del siglo XX, ha tenido por resultado el deterioro de la calidad de vida. Se rebasan las posibilidades de absorber de manera adecuada las necesidades de una población sin capacidad de asentarse con fines de permanencia. Consecuencia de estos asentamientos de escasa o nula planeación que se extendieron rápidamente y sin control, es el uso del suelo severamente deteriorado por la extrema modificación y degradación del ambiente. Esta modificación-degradación se verá reflejada en las nuevas condiciones atmosféricas consecuencia de la amalgama de materiales y la distribución de las edificaciones y la presencia de escasísimas áreas verdes.

3. Efectos de las ciudades en el clima

El clima afecta a las ciudades, pero también las ciudades logran modificaciones en el clima. En este capítulo se reconoce la influencia de las superficies urbanizadas en los elementos climáticos de la ciudad. La temperatura, que asciende en las zonas densamente edificadas, representa la principal modificación climática debida a la urbanización. En este apartado se plantea una metodología para ponderar su intensidad, de manera que la diferencia térmica sea temporal y espacialmente representativa.

3.1 La reducción a escala de una ciudad. La importancia como espacios modificados.

Las ciudades son espacios creados artificialmente que han adquirido características distintas al entorno que las contiene. La forma en cómo ha hecho uso de los recursos y del suelo que la sostiene modificó el ambiente natural y lo volvió más vulnerable, pues en un espacio muy reducido aglomera población y bienes susceptibles de ser afectados por la incidencia de fenómenos naturales (los climáticos, entre ellos), y no naturales.

La planificación urbana es vital, sobre todo en ciudades con rápido crecimiento donde la reducción de riesgos asociados a fenómenos meteorológicos, hidrológicos y climáticos y en otros aspectos del desarrollo urbano, hacen necesario conocer cuáles son los procesos atmosféricos y climáticos que inciden sobre ellas (Conde, *et al.* 2013). Esto implica conocer de qué manera la atmósfera es un factor que afecta a la superficie y sus habitantes, y cómo la superficie, a su vez, afecta a la atmósfera posada sobre ella. La interfase ciudad-atmósfera es extremadamente compleja, por lo que es necesario tener un buen entendimiento del papel y la importancia de las superficies urbanas para así predecir o reducir los efectos negativos de la urbanización, en el mejor de los casos (Grimmond y Souch, 1994).

Es necesario tener una comprensión acerca de las escalas en que la superficie terrestre afecta el aire posado sobre ella. La escala local y la microescala comprenden principalmente la zona atmosférica de trabajo (Fig.10).

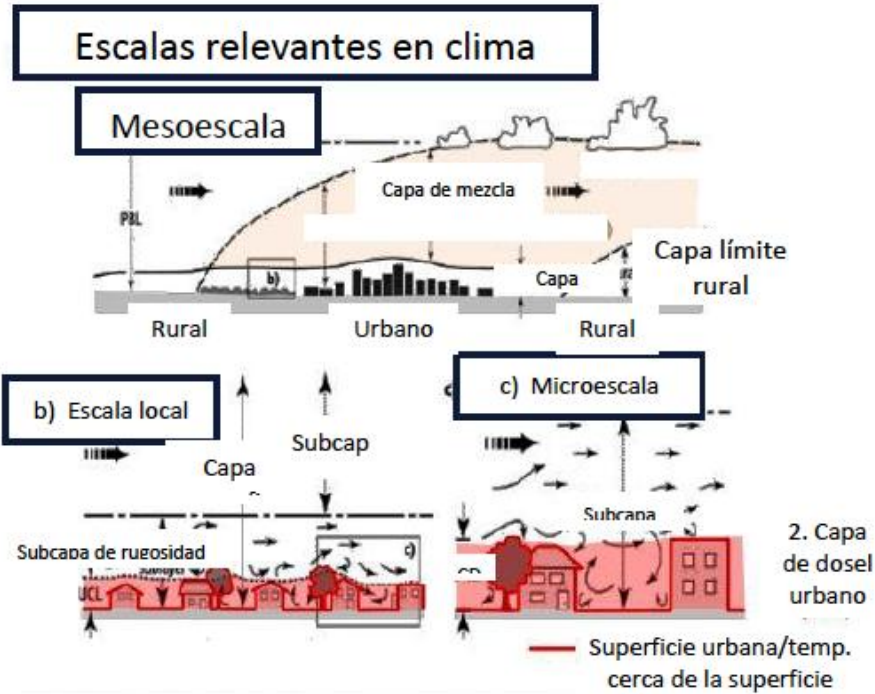


Fig. 10. Escalas y capas atmosféricas en el clima urbano. Fuente: modificado al español de M. Srivani, 2013, modificado de Oke, 1997.

Oke (1987a) explica que la influencia de la superficie de la Tierra se limita a los primeros diez kilómetros, sin embargo en periodos determinados se restringe a una capa mucho más delgada, a la que se conoce como “capa límite atmosférica” la cual no tiene una altura determinada ya que depende de la turbulencia generada por el calentamiento de la superficie. Dentro de ésta, a un menor nivel y producto de la rugosidad de la superficie y por los procesos de convección, se encuentra la capa “superficial turbulenta” que se extiende hasta aproximadamente 50 metros durante el día, mientras que por la noche se reduce a unos cuantos metros de profundidad. Pero una todavía más cercana a la superficie es la capa de rugosidad cuya altura depende del nivel medio de los edificios y del espaciamiento entre ellos, y se extiende a dos o tres veces más en altura de este dosel urbano (Fig. 11).

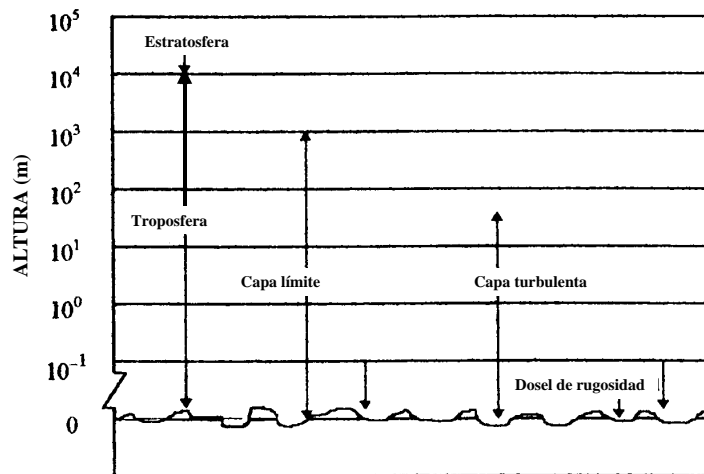


Fig. 11. Principales subcapas troposféricas. (Oke, 1987a).

Oke (1987a) también explica que la disipación de la energía proveniente del Sol es entonces distinta si se trata de un medio urbano o rural. En un ambiente urbano, durante el día, los materiales se calientan de forma progresiva y más lentamente que los suelos con vegetación o desnudos de las zonas rurales, durante la noche los materiales urbanos más densos conservan durante más tiempo el calor que ganaron durante el día. La presencia de edificios y calles en la ciudad, creando lo que se conoce como cañones urbanos, dificulta la pérdida de calor y modifica el movimiento del aire en superficie. El campo, en cambio, se enfría a gran velocidad. Esta diferencia en la repartición de la energía solar incidente en las superficies tiene como fundamento la forma en que se presenta la ley de la conservación de la energía, es decir, en el balance energético.

A la radiación solar incidente se le resta la radiación reflejada y emitida por la superficie, quedando entonces la radiación neta, (Q^*). Esta radiación es la energía que queda disponible en el sistema suelo-atmósfera sobre la que ocurren los siguientes procesos: una parte es cedida por la superficie a la atmósfera como calor sensible turbulento (para calentar el aire a través de remolinos que transportan calor, Q_h), otra porción también es cedida del suelo a la atmósfera como calor latente de evaporación (para evaporar agua, Q_e) y otra parte se queda como calor retenido en los materiales del tejido urbano Q_s . Hay que añadir también la radiación de origen terrestre que es absorbida por la capa de esmog, más el calor de origen antropogénico (Q_f) (Oke, 1987a) (Fig. 12).

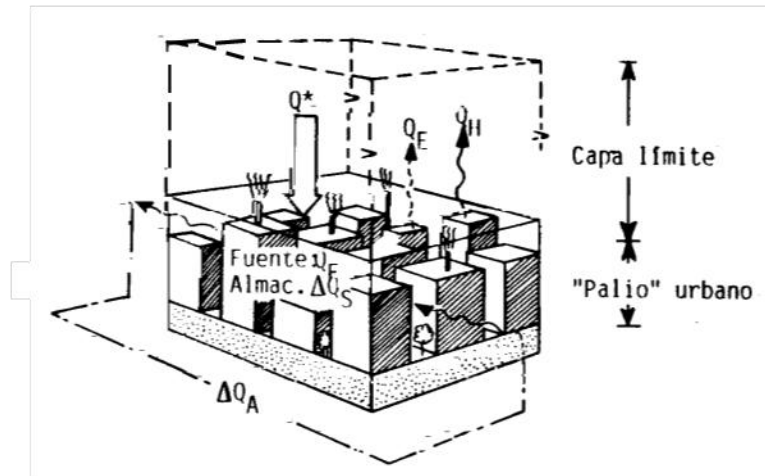


Fig. 12. Esquema de las componentes energéticas en un volumen edificado con aire. (Oke, 1987b).

Finalmente, la forma en que se dan estos procesos, las distintas proporciones en que se presentan en el balance energético atmosférico dependerá de cómo sea el tipo de uso de suelo existente. La complejidad del tejido urbano hace que las componentes del balance energético muestren comportamientos diferentes.

Es así como, en una ciudad de construcciones masivas y con escasas áreas verdes (como es el caso de las ZMCM) se refleja un balance energético con un calor latente de vaporización muy bajo comparado con un área rural. A su vez, la disipación de calor sensible es mucho mayor, es decir, se dedica una mayor parte de la energía disponible para calentar el aire. Si hay una baja disponibilidad de agua, se espera que la Q_e decaiga y aumente la Q_h . La radiación infrarroja que es bloqueada por los cañones urbanos hacen que el balance térmico global sea positivo, contribuyendo a calentar el ambiente (Asimakopoulou *et al.*, 2011).

La diferencia, entonces, resulta del papel que juega la evapotranspiración, es decir, que en el medio rural la radiación solar se consume primordialmente en evaporar agua, mientras que en el medio urbano la energía se emplea más en calentar las edificaciones al existir menos superficies húmedas. La combinación de radiación solar de onda corta incidente (cielos despejados) y la baja humedad del suelo, resulta en una ganancia de energía durante el día, pero una baja capacidad en la superficie y una rápido enfriamiento del suelo o vegetación durante la noche, produce diferencias térmicas urbano-rurales (McCarthy y Sanderson, 2011). Una superficie heterogénea produce una variabilidad significativa en los flujos de energía a varias escalas espaciales (Niyogi, 2009).

Producto de estas diferencias en la forma en que se disipa el calor en los ambientes urbanos y rurales es el fenómeno conocido como *isla de calor* (I de C), término utilizado en los años cuarenta del siglo XX, la cual se muestra como una diferencia marcada de mayores temperaturas al interior de la ciudad con respecto a los alrededores rurales (Stewart, 2012). Esta puede ocasionar un cambio térmico tanto o más importante que el generado por los gases de efecto invernadero (McCarthy y Sanderson, 2011; Dirmeyer *et al.*, 2010).

Estas diferencias varían según las características de cada sitio, pero las mayores temperaturas coinciden frecuentemente con el centro de las ciudades, lo cual resulta lógico si es donde se presenta una concentración más densa de edificaciones.

A la fecha no se sabe aún de daños causados por el efecto de la *isla de calor*, pero su presencia puede ser un elemento que contribuya al deterioro de las condiciones climáticas en las ciudades, inclusive en un posible incremento sustancial en la morbilidad y la mortalidad resultado del estrés por calor.

Las alteraciones en la temperatura son quizá la muestra más visible del efecto urbano, sin embargo ligado estrechamente a la ya tan estudiada isla de calor, se encuentra el comportamiento de las lluvias. Siguiendo una relación con el patrón térmico, la lluvia también puede comportarse como una isla, es decir, de forma diferente con respecto al exterior de la ciudad por efecto de la urbanización (Jáuregui, 1974). El tamaño de la ciudad puede ejercer una influencia al proporcionar energía turbulenta adicional, dando como resultado episodios de lluvia más intensos que provocan serios problemas como inundaciones, deslaves, daño en la infraestructura urbana e incluso pérdida de vidas, según la intensidad de la precipitación y la vulnerabilidad de la población. La estacionalidad de las lluvias continúa correspondiendo a la influencia de los sistemas de macroescala, la modificación radica, entonces, en la forma como llueve.

Una afectación más producto de la escasez de áreas verdes en las zonas urbanas es la disminución de la humedad atmosférica. Básicamente el que un sitio con reducidas fuentes de humedad tenga que ser menos húmedo que el entorno rural, es una idea lógica, y las mediciones instrumentales normalmente así lo demuestran. El comportamiento de la humedad atmosférica, sin embargo, es difícil de evaluar. Las observaciones hechas en ciudades de latitudes medias aclaran el concepto erróneo de que la ciudad es siempre más seca que el campo (Jáuregui y Tejeda, 1997) por el mismo efecto del calor acumulado en los materiales.

Los elementos climáticos están estrechamente ligados unos a otros, el efecto que ejerce la urbanización alcanza también a la circulación atmosférica, a una escala menor, en una

circulación a nivel local. El comportamiento del viento en las ciudades es otro tema que en últimos tiempos ha ganado interés, como lo demuestran los trabajos de Eliasson, *et al.*, 2006; Lopes *et al.*, 2009; Lopes *et al.*, 2011; Kondo *et al.*, 2008, también por la relación con el transporte de los contaminantes atmosféricos: Jazcilevich *et al.* 2003; Jazcilevich *et al.* 2005; Moussiopoulos *et al.*, 1994; Ahmad *et al.*, 2005; Kumar *et al.* 2008.

La interacción de los vientos de macro escala, así como los que resultan del relieve, generan patrones de comportamiento de forma estacional y a lo largo del día (Jáuregui, 2000). La identificación de los patrones de viento dentro de la ciudad, a un nivel mucho menor que los sistemas de mesoescala, no generaría quizá tanto interés como objetivo en diversos estudios de no ser por la necesaria dilución de los contaminantes, situación que ha llegado a niveles alarmantes, en muchos casos, curiosamente, por falta de viento.

No todas las ciudades, por supuesto, presentan las mismas afectaciones. Las diferencias en cuanto a la ubicación, las características del tejido urbano, la planeación o falta de ella en su proceso de crecimiento y en general la situación socioeconómica resaltarán las modificaciones sustanciales climáticas entre ellas. Además, no siempre los cambios tendrán un aspecto negativo, existen ciudades que han invertido las características hostiles originales de algunos lugares (como las que crecen en mitad de zonas áridas), alterando el clima local. Lo modifican dando lugar a situaciones de menor temperatura, mayor humedad, menor cantidad de partículas en la atmósfera, etc. La ciudad puede convertirse, por estos motivos, en una especie de "oasis" (Oke, 1987).

Una ciudad presentará, entonces, las características climáticas que su ubicación geográfica le confiere (tropical, de latitudes medias o altas, a nivel del mar o de montaña, etc.) agregando las modificaciones debidas al efecto urbano. Se establece una diferencia climática de considerable importancia en un área reducida con respecto a los alrededores, un área densamente poblada que, sin embargo, no se encuentra climáticamente separada como una región particular y que los modelos de circulación general no consideran. Es necesario, entonces, hacer estudios con modelos regionales, tanto para ciudades como para las amplias zonas montañosas (Tejeda *et al.*, 2008), es decir, hacer una reducción en la escala. Los cambios en las condiciones locales, como aquellos en el uso del suelo, pueden tener un mayor impacto en el clima de la región que las modificaciones en la circulación de gran escala (Magaña, 1995).

Los resultados de algunos modelos de circulación general respecto a las proyecciones existentes, por ejemplo en el caso de la precipitación (sobre todo la de verano), depende de circulaciones de mesoescala, por lo que los cambios potenciales en las lluvias de esa

época son difíciles de diagnosticar (Magaña, 1995). Hay que prestar atención a los procesos que suceden en y cerca de la superficie.

3.2 Las modificaciones climáticas por la urbanización en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Temperatura

Al describir la zona donde se asienta la ciudad de México como tropical de altura o tropical de montaña, Jáuregui (1971,1973) proporciona una idea clara de cómo la altitud modifica un sitio eminentemente tropical. La ciudad, de clima suave, muestra sin embargo las implicaciones de un crecimiento acelerado. Trabajos incipientes elaborados por Jáuregui (1959, 1960, 1963, 1965, 1971a, 1971b, 1973, 1974) que describen el clima de la ciudad de México, dan énfasis a cómo el cambio en el uso del suelo se dio de forma intensiva durante el periodo de crecimiento por la migración y el establecimiento de la industria a mediados del siglo XX. Una de las modificaciones atmosféricas, como se comentó anteriormente, resultado de esta nueva superficie a base de concreto, pavimento y suelo desnudo es el incremento de temperatura por una mayor absorción de la radiación solar, fomentando una diferencia térmica variable en el tiempo y en el espacio respecto a los alrededores rurales. El estudio de esta particularidad climática urbana, la *isla de calor* explicada anteriormente, llevó a Ernesto Jáuregui a convertirse en un iniciador del conocimiento del clima urbano en México.

En la ZMCM, esa isla de calor semeja una burbuja de aire tibio que se manifiesta en situaciones de calma y cielos despejados (condiciones que se producen generalmente durante la época invernal) (Jáuregui, 1987). Es un fenómeno que se ha estudiado en México a través del análisis de datos climatológicos, de experimentos con mediciones instrumentales simultáneas y a partir de los resultados de campañas de balance energético en diversos sitios dentro y fuera de la ciudad (Oke y Jáuregui, 1992; Tejeda, 1996; Barradas *et al.*, 1999; Oke *et al.*, 1999; Sozzi *et al.*, 1999; Luyando, 2004; Tejeda y Jáuregui, 2005).

Los inicios del estudio de este fenómeno en la ZMCM datan de la década de 1970, sin embargo a finales del siglo XIX el climatólogo mexicano Manuel Moreno y Anda publica un trabajo sobre la diferencia térmica entre la ciudad (Palacio Nacional) y un sitio que en aquel entonces se consideraba rural (Tacubaya). Moreno, sin tener todavía conocimiento de las ideas publicadas acerca de este fenómeno térmico en algunas ciudades europeas

(Howard, 1833; Renou, 1862, 1868), encuentra una diferencia de 1.4°C que no atribuye a la diferencia de altitud existente entre los dos sitios (pues sólo se trata de 54 metros), pero tampoco lo atribuye a los motivos que hoy en día se sabe corresponden al contraste urbano-rural (Jáuregui, 1993). Aun así, su meticulosa observación es pionera en estudios climáticos de índole urbano en la Ciudad de México.

La evolución de la isla de calor en esta ciudad de crecimiento acelerado, ha ocasionado una gran variación térmica (diurna y estacional) entre la zona urbana y el campo. La I de C nocturna es la más frecuente (de las 21:00 a las 9:00), sobre todo en el periodo seco del año (noviembre-abril) con una intensidad media de 5°C. Durante el periodo de observaciones de abril de 1994 a mayo de 1995, las islas de calor diurnas, tanto en las horas de la mañana como de la tarde, se observaron principalmente en la época lluviosa y su intensidad media fue de 3 a 5°C (Jáuregui, 1997). Prevalecen las nocturnas (al final del periodo de enfriamiento, es decir, justo antes del amanecer) en un 75% de las veces de ocurrencia sobre un 25% de las diurnas, las cuales se generan casi siempre por el enfriamiento en el proceso de evaporación de las superficies húmedas.

Los aspectos físicos de cómo se llevan a cabo estas variaciones térmicas en la atmósfera urbana de la Ciudad de México y de sus alrededores se han analizado a través de campañas de balance energético (Oke y Jáuregui, 1992; Barradas *et al.*, 1999; Tejeda y Jáuregui, 2005; Tejeda, 1996; Luyando, 2004). La mayor proporción de energía solar en el ambiente netamente urbano de la ciudad de México se utiliza en el almacenamiento de calor en los materiales de las construcciones predominantemente masivas, comparable con los resultados obtenidos en otras ciudades de latitudes medias, aunque fuertemente asociado a los sitios desérticos dada la escasa vegetación en el interior de la metrópoli. En ambientes urbanos se toma en cuenta una ganancia extra de calor procedente de las fuentes antropogénicas, es decir, de la energía desprendida por la industria, calefacciones, los vehículos, etc., y la radiación de origen terrestre que es absorbida por diferentes contaminantes y gases en la atmósfera (vapor de agua, bióxido de carbono).

Sin embargo, la identificación y observación del comportamiento de la isla de calor en la ZMCM no contó en el inicio de su análisis con las ventajas de los estudios realizados en ciudades de latitudes medias, generalmente en países de mayores recursos económicos. El limitado número de estaciones y observatorios con información suficiente para una caracterización precisa del fenómeno no desalentó a investigadores como Ernesto Jáuregui, quien supo inferir, interpretar y resaltar la importancia de las modificaciones del clima a una escala local. Gran parte de estos trabajos encontraron el testimonio invaluable de lugares como el Observatorio de Tacubaya, actualmente perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), cuyo largo periodo de registro (noventa y ocho años en su

ubicación actual) ha aportado evidencias de las diferencias térmicas por el paulatino cambio en el uso del suelo, originalmente rural y posteriormente urbano. Sin embargo, su ubicación en el piedemonte no la hace representativa totalmente del clima del valle donde se asienta la ciudad, pero su paso a lo largo del siglo XX por las distintas etapas de urbanización se refleja claramente en el comportamiento de las variables climáticas.

Por otro lado, en la región sur de la ZMCM, se encuentra el observatorio del Colegio de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (en el campus universitario), el cual inició sus actividades en los años sesenta, justo en el periodo de mayor crecimiento poblacional y de expansión de la ciudad. A pesar de su ubicación, cuyos alrededores conservan la distribución original de jardines y edificios escolares, las curvas de temperatura muestran el incremento térmico debido al dramático cambio de uso del suelo en las zonas no inmediatas al observatorio, pero sí de las que rodean a la ciudad universitaria.

Es así como el Observatorio de Tacubaya y el Observatorio del Colegio de Geografía, a través de los registros de temperatura mínima, muestran el comportamiento del ambiente térmico relacionado con el cambio en el uso del suelo. La Figura 13 muestra que en Tacubaya, con un registro mucho más largo, se refleja con mayor severidad la drástica urbanización en sus alrededores originalmente rurales, donde las temperaturas mínimas a principio-mediados del siglo XX rondaban los 8°C, mientras que a principio del siglo XIX ha logrado rebasar los 12°C de promedio anual. La tendencia muestra 0.04°C de incremento por año. El Observatorio de Geografía (Fig. 14) tiene también una tendencia de 0.04°C por año, aunque con un registro mucho más corto que Tacubaya.

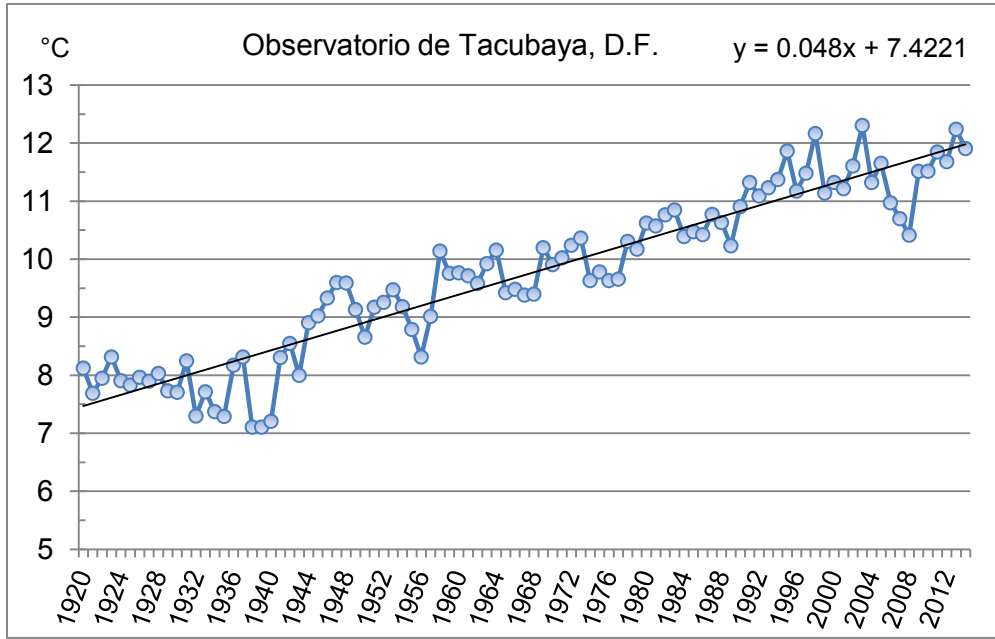


Fig. 13. Temperatura mínima anual promedio para el Observatorio de Tacubaya. Periodo 1920-2014.

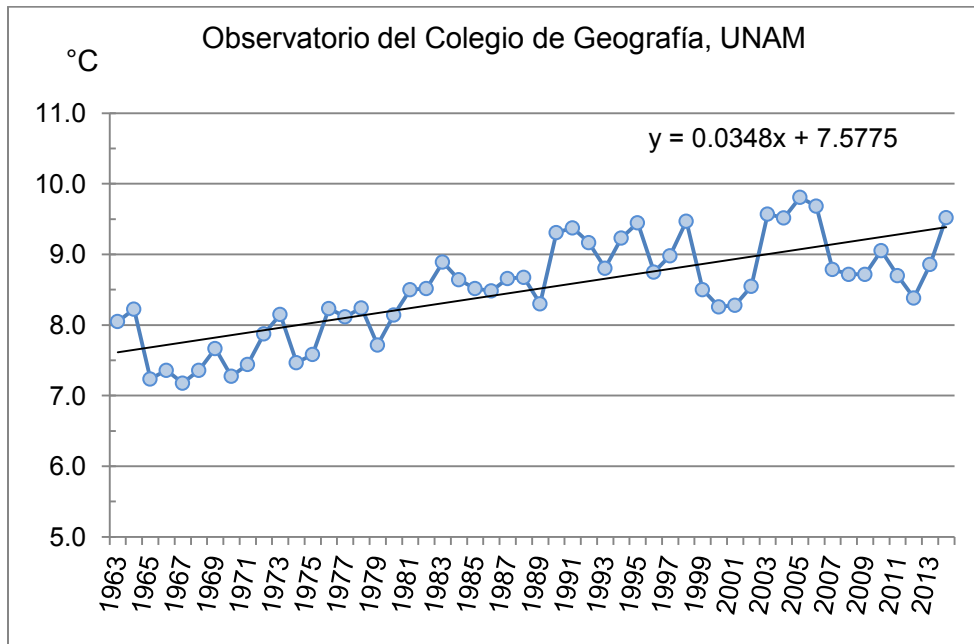


Fig. 14. Temperatura mínima anual promedio para el Observatorio de Geografía, Ciudad Universitaria. Periodo 1963-2014.

Los registros de temperatura máxima por lo general no proporcionan una evidencia clara del incremento en la intensidad de la isla de calor, esto debido a que usualmente dentro y fuera de la ciudad el máximo de temperatura se alcanza de manera semejante. Sin embargo, según se observa en las Figuras 15 y 16 para los observatorios antes mencionados, se presenta una tendencia a la alza en ambos sitios (0.01 °C por año en el observatorio de Tacubaya y 0.03°C en el Colegio de Geografía, de registro más corto), lo cual puede plantear la dificultad de establecer el origen y las atribuciones acerca del calentamiento urbano y/o global. Por lo pronto, sin ser concluyente para la Ciudad de México, López-Díaz (2014) realiza el hallazgo de que para la zona central del país, las temperaturas máximas tienden a elevarse con motivo del calentamiento global. La base de su afirmación se basa en la ciudad de Guanajuato. La Ciudad de México, por la urbanización, perturba los registros y las conclusiones.

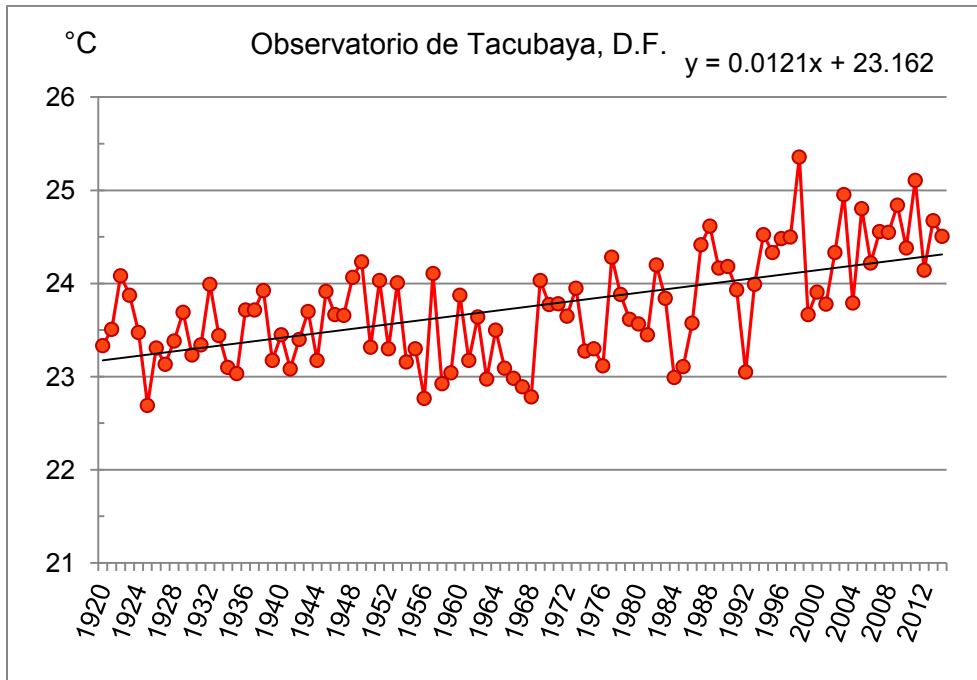


Fig. 15. Temperatura máxima promedio anual para el Observatorio de Tacubaya. Periodo 1920-2014.

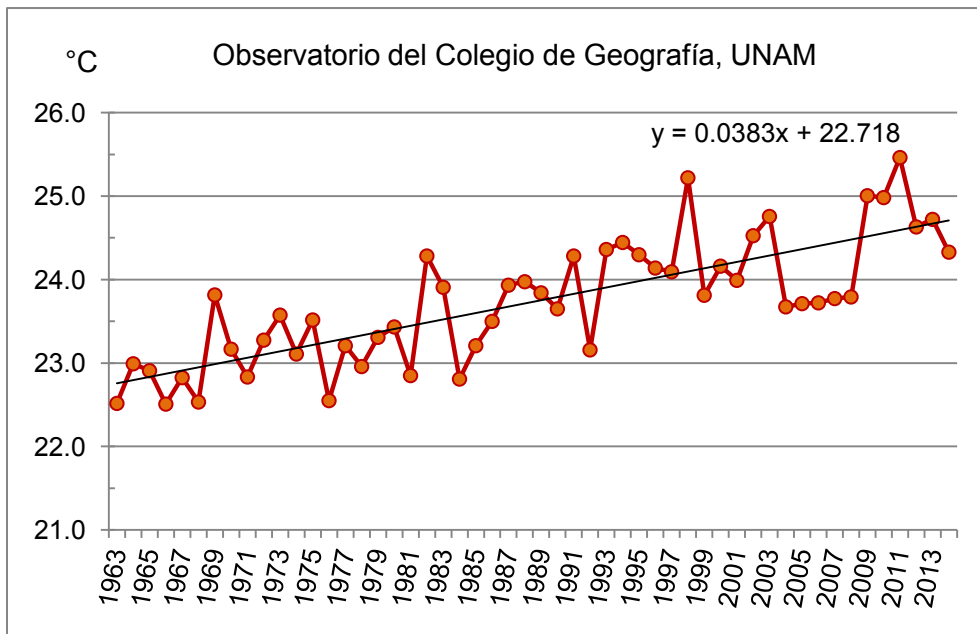


Fig. 16. Temperatura máxima promedio anual para el Observatorio del Colegio de Geografía de la UNAM. Periodo 1963-2014.

Precipitación y humedad

En la cuenca donde se ubica la ZMCM, la estación húmeda se mantiene sensiblemente invariable en el tiempo siendo básicamente de tipo monzónico, es decir, con una temporada de lluvias bien identificada de mayo a octubre y una de sequía de noviembre a abril. Aproximadamente el 90% de las precipitaciones ocurren durante el verano con las lluvias más intensas y sólo un 10% contribuyen al total en la época invernal (Jáuregui, 2000). La zona norte semiárida de la cuenca cuenta con un menor número de días lluviosos, mientras que las partes montañosas del poniente y sur-poniente cuentan con más de cien días al año con precipitación apreciable. Las lluvias sufren el efecto de la dinámica que induce la orografía (Fig. 17), el cual interactúa con los vientos de superficie (de componente del Este), generando movimiento ascendente que refuerza el desarrollo vertical en la nube (Aquino, 2012).

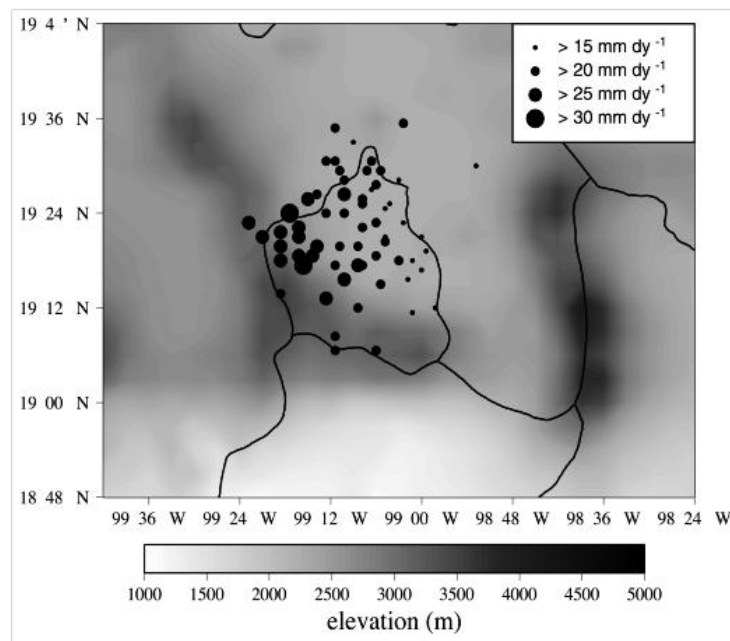


Figura 17. Umbral de los valores extremos para determinar eventos de precipitación. La topografía se muestra en intensidades de gris. Fuente: Magaña *et al.*, 2003.

Es importante hacer notar que si bien el régimen de lluvias se ha conservado (seis meses de secas y seis de lluvias comenzando en mayo y terminando en octubre), la intensidad,

temporalidad y distribución espacial sí ha sufrido modificaciones. La intensidad de los episodios de precipitación mostraba ya diferencias en los años setentas en el Observatorio de Tacubaya (Jáuregui, 1974) en comparación con los registros obtenidos en la segunda década del siglo XX. Las causas de estas modificaciones tienen un origen que, si bien no es fácil de definir, suponen la influencia de la nueva superficie urbanizada. El mayor calentamiento de la superficie, dadas las características de los materiales con que está construida, refuerzan y alientan la formación de nubes de desarrollo vertical que generan aguaceros y granizadas intensas. La forma en que se presentan las precipitaciones en la ZMCM en cuanto a intensidad y frecuencia de los aguaceros se desarrolla en el Capítulo 4.

Aparejado con la intensidad de los aguaceros, la lluvia anual acumulada acusa una tendencia positiva (Jáuregui, 2000; Aquino, 2012) aunque más acentuada en unos sitios que en otros dentro de la cuenca de México. Los registros de lluvia en el Observatorio de Tacubaya muestran un claro ascenso (18 mm por década) en la cantidad de precipitación, contando con la variabilidad normal en el periodo que abarca desde que el observatorio se ubica en su emplazamiento actual (Fig. 18).

Los registros del Observatorio de Geografía (Fig. 19) muestran una tendencia de 25 mm por década. Ambos sitios se ubican en la porción húmeda de la ciudad (Estrada *et.al.*, 2009) en el pie de monte, cabría revisar con mayor detenimiento lo que sucede en la “zona seca”, donde se sabe de una menor precipitación comparada con el poniente, pero no así la tendencia a lo largo de las décadas. Otras estaciones climatológicas en la ciudad muestran que no hay ningún ascenso o bien, en caso de haberlo, no ha sido significativo (Martínez, 2011). Quedaría entonces la incógnita de dónde ha provenido la humedad necesaria para este incremento en la precipitación del poniente de la ciudad, tomando en cuenta que es cada vez menor el número de fuentes evaporativas.

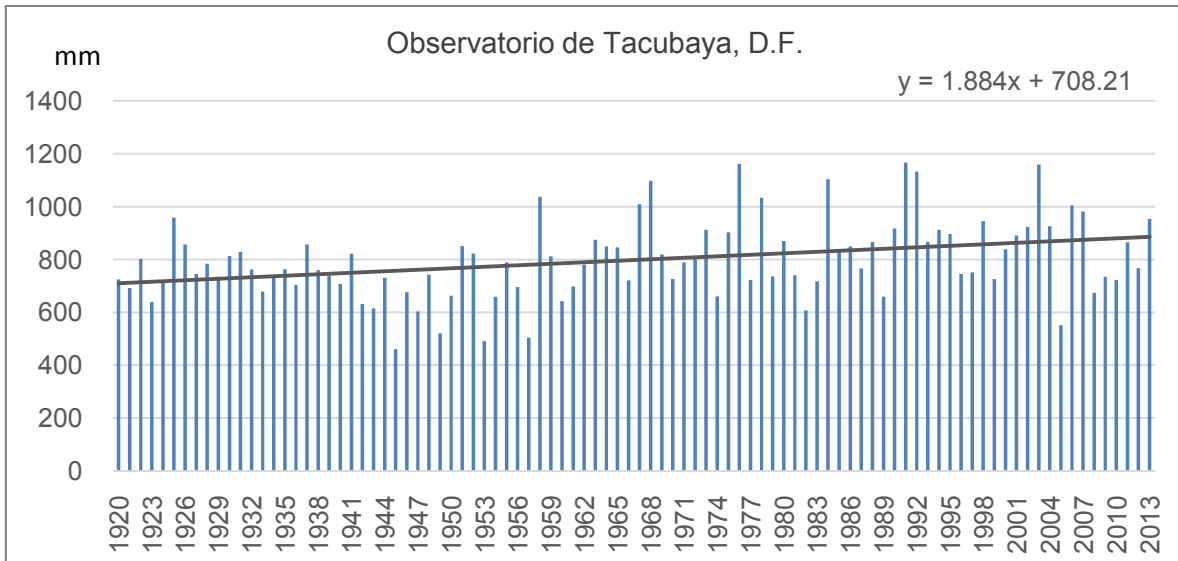


Fig. 18. Precipitación total anual para el Observatorio de Tacubaya. Periodo 1920-2013.

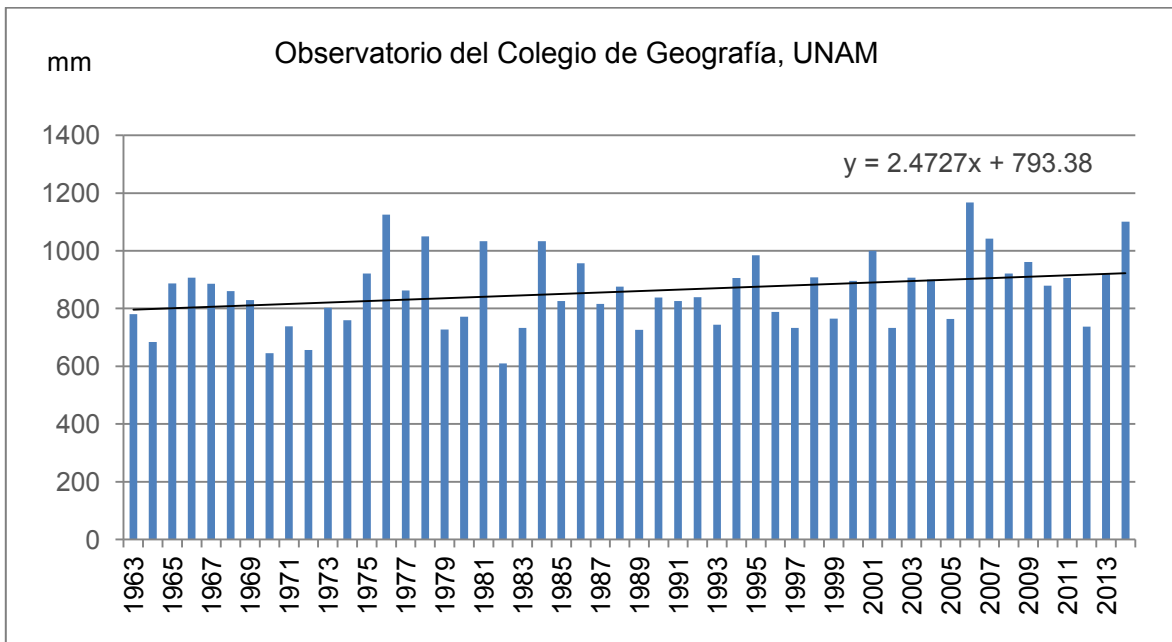


Fig. 19. Precipitación total anual para el Observatorio de Geografía, UNAM. Periodo 1963-2014.

La evaporación en el Observatorio de Tacubaya se ha incrementado, presumiblemente por efecto del calentamiento de las superficies urbanas en un crecimiento de la ciudad hacia el poniente (Jáuregui y Luyando, 1998). También existe evidencia de un decrecimiento hacia el otro lado, en la zona oriente, al parecer por la influencia del

proyecto del Lago de Texcoco revegetado (comenzado en 1982) y la presencia de sus cuerpos lacustres.

Asimismo ha sido interesante observar la evolución de la humedad relativa en Tacubaya, la cual ha sufrido un descenso desde inicios del siglo XX y un repentino incremento a inicios del XXI. La humedad no es un parámetro que indique con claridad las modificaciones en el uso de suelo, ni su comportamiento a lo largo del día o de forma estacional. Sin embargo, Jáuregui y Tejeda (1997) encuentran para la humedad específica (que es la cantidad de gramos vapor de agua contenido en un kilogramo de aire) un patrón estacional diurno, donde en la época de lluvias y por las noches, la atmósfera urbana es más húmeda que la rural debido al calor de la ciudad que alienta la evaporación. Durante la tarde el proceso es el opuesto. En la época de secas (noviembre-abril), el contraste es casi insignificante pues la evapotranspiración es mínima dentro y fuera de la ciudad.

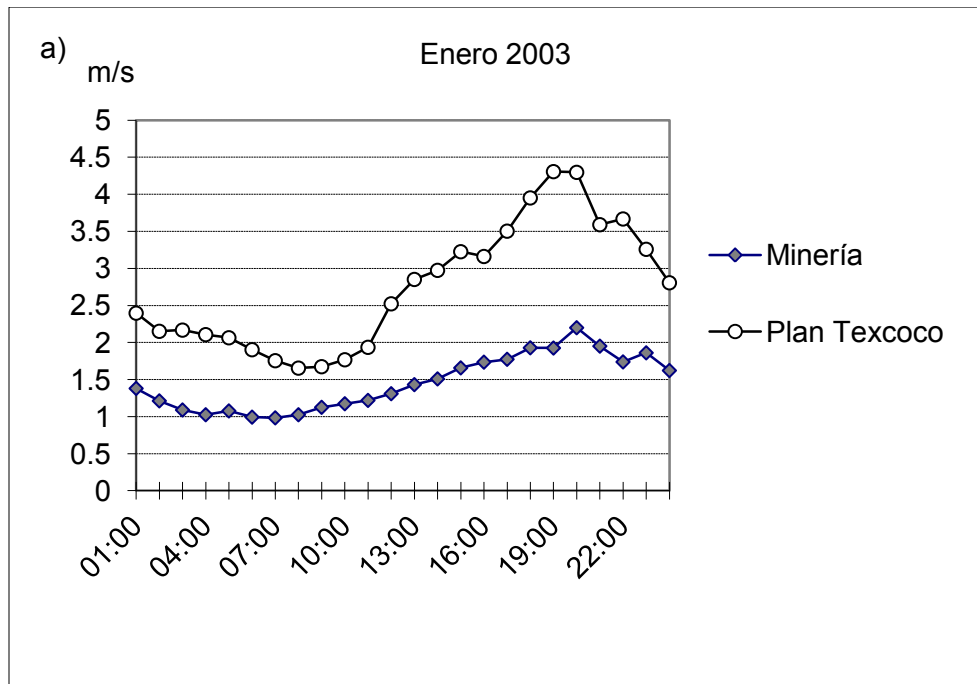
Aun así, es de conocimiento generalizado el beneficio ambiental que aportan las áreas verdes y cuerpos de agua dentro de las ciudades (Martínez y Jáuregui, 2000). El papel que han desempeñado en la Ciudad de México en su aporte de humedad y como sumideros de calor se ha evaluado desde hace años con la influencia del Bosque de Chapultepec (Jáuregui, 1991) el cual ha aportado beneficios al disminuir el estrés por calor en las zonas urbanas aledañas al parque, incrementando al mismo tiempo la turbulencia en el viento, el cual encuentra una especie de barrera en los árboles de gran altura que habitan el sitio.

La ventilación

La circulación en la cuenca de México muestra patrones estacionales y diurnos, con la presencia de vientos locales que ejercen su influencia de la montaña al valle durante la noche y en sentido inverso durante el día. Esta circulación local desaparece cuando se da paso a los sistemas de mayor escala que barren la ciudad, predominantemente provenientes del norte en invierno (por influencia de los vientos del oeste) y del noreste en verano (por el arribo de los vientos Alisios), en las horas vespertinas (Jáuregui y Luyando, 1992).

Además, la isla de calor, que suele migrar durante el día del centro de la ciudad hacia la parte oriente, ejerce una influencia en la circulación dentro de la ciudad. Esta circulación "urbana" se presenta en las noches y es reforzada por el viento que escurre de las laderas de las montañas (Klaus *et al*, 1999), llamado *viento catabático*, el cual se origina por enfriamiento radiativo. El viento dentro de la ciudad, con o sin influencia de la isla de calor,

suele tener menor rapidez que en el área rural, lo cual se debe principalmente al efecto de la fricción en su paso por la superficie rugosa y dispereja de la ciudad. Los edificios funcionan como una barrera absorbiendo la energía del viento. Las estaciones climatológicas, una ubicada en el centro de la ciudad (Palacio de Minería) y otra rural (Plan Texcoco), muestran estas diferencias para dos meses estacionalmente representativos (lluvias y secas) (Fig. 20).



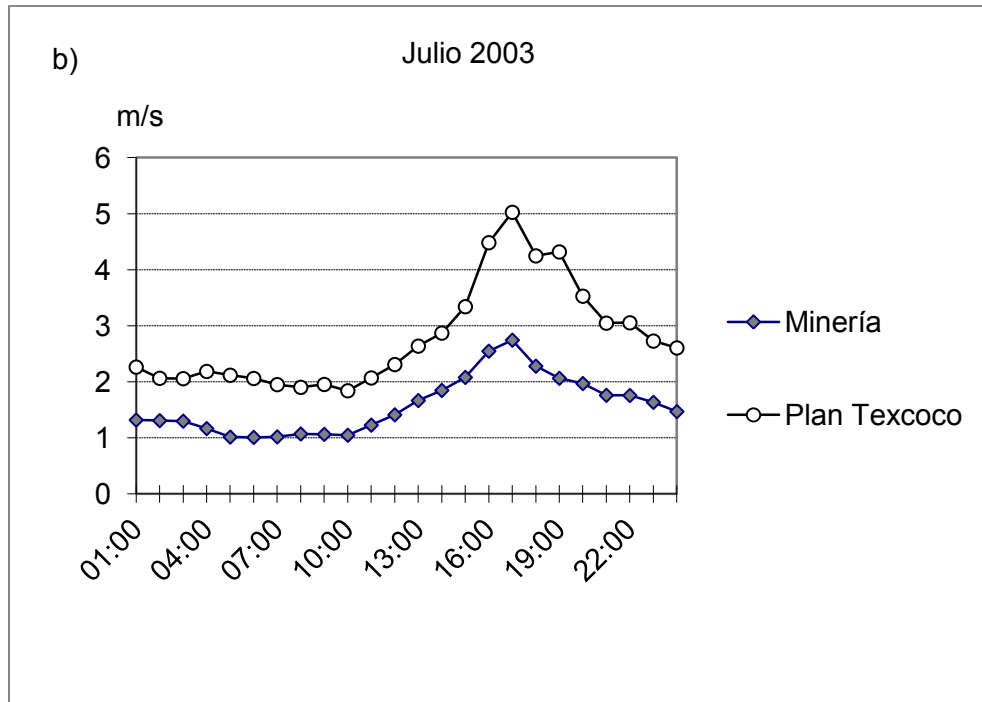


Fig. 20. Promedio mensual de la velocidad del viento (m/s) para a) Palacio de Minería y b) Plan Lago de Texcoco en dos meses representativos de la época de secas (enero) y de lluvias (julio) en la Ciudad de México. Fuente: elaboración propia.

El viento dentro de la ciudad se ha relacionado generalmente con la concentración y dilución de los contaminantes que ahí se generan. Las tormentas de polvo, causantes de una disminución en la visibilidad y del aumento de enfermedades respiratorias y gastrointestinales, dejaron de ser un problema grave después del desarrollo del beneficioso Proyecto Plan Texcoco y su lago Nabor Carrillo sobre los suelos salinos y sueltos que quedaron expuestos desde el vaciamiento de la cuenca (CONAGUA, 2012).

En últimas décadas, la asociación de viento fuerte pero con tormentas de lluvia ha llamado la atención por los estragos que genera en la ciudad. Derribo de árboles, cables de electricidad, anuncios espectaculares y otros daños han puesto de manifiesto su presencia en los medios de comunicación. Sin embargo, su relación con la dilución de contaminantes atmosféricos es un asunto más cotidiano, y su influencia en la disipación de los gases y las partículas se relaciona con las condiciones de una atmósfera estable o inestable. La atmósfera estable sobre la ciudad propicia una capa de contaminantes suficientemente compacta para atenuar la radiación solar, donde en días totalmente despejados de nubes se deja de recibir sobre la superficie aproximadamente un 20% de esta radiación en la zona central de la ciudad, como se muestra en la Figura 21 en el

Palacio de Minería y en el Observatorio de Tacubaya en comparación con la estación rural en Plan Texcoco (Jáuregui y Luyando, 1999).

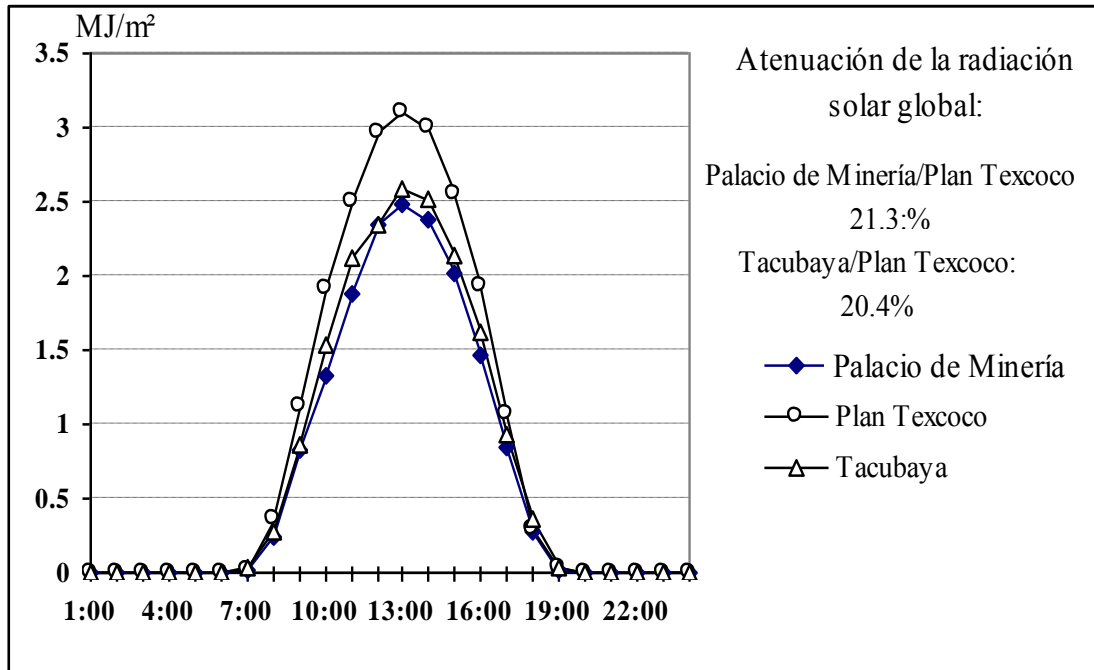


Fig. 21. Radiación solar global media para Palacio de Minería, Tacubaya y Plan Texcoco en días despejados de la temporada de secas 1995-1996. Fuente: Jáuregui y Luyando (1999).

Por supuesto que la contaminación no se contempla nunca como un beneficio, sin embargo la atenuación de la radiación solar, en sí, reduce de alguna manera el efecto (que puede ser dañino) de los rayos solares, además de proveer de atardeceres muchas veces espectaculares. Este efecto climático, al igual que la presencia de la isla de calor en las frías horas del amanecer, pueden tener algún efecto benigno.

El cambio de uso de suelo, en una drástica urbanización de la zona donde se ubica la ZMCM, ha sido responsable de las modificaciones atmosféricas a escala de la ciudad, contando con la colaboración eficiente de la deforestación y la agricultura de los sitios próximos (Jáuregui, 1973). La cuenca de México, originalmente de lagos y vegetación, fue drenada hasta casi sus últimas consecuencias a principios del siglo XX, cuando todavía sobrevivía un lago de 120 km². El crecimiento de la ciudad se dio sobre ese lecho seco, dando origen a las colonias con población de escasos recursos, en un ambiente totalmente distinto, donde lo extremos de variación térmica se han debido, más que al crecimiento del área urbana, a la desaparición de los lagos (Jazcilevich *et al.*, 2000).

La importancia que han cobrado las ciudades respecto al cambio climático, tanto como origen de las modificaciones como destino principal por la cada vez más numerosa población que habita en núcleos urbanos, es sustancialmente mayor actualmente. Estudios recientes acerca del clima y el cambio del clima de la ciudad de México se han desarrollado a través de instancias como el Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México (CVCCCM), donde proyectos prioritarios referentes a la utilización de los recursos hídricos, salud, mitigación, suelo de conservación, energía, transporte, entre otros, contribuyen a la formulación y ejecución de políticas públicas innovadoras que generen mayor adaptación y calidad de vida, menor vulnerabilidad, disminución en los riesgos y amenazas para los habitantes de la ZMCM (CVCC, <http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/>).

3.3 Estimación de la *Isla de Calor*

La ciudad de México ha tenido un crecimiento en extensión y en población que no se detendrá hasta alcanzar la estabilidad demográfica, aproximadamente a mediados del siglo XXI. Este crecimiento seguirá contribuyendo a la formación de fenómenos como el de la isla de calor en versiones de mayor intensidad, dado el tamaño en extensión de la superficie urbana, su estructura difusa y la cantidad de población que la habita. Esta máxima intensidad se ha incrementado con el crecimiento de la ciudad, llegando incluso, en casos puntuales, a diferencias urbano rurales de 10°C (Jáuregui, 2009). Se define como intensidad máxima de la isla de calor a la diferencia de temperatura, entre la zona más cálida dentro de la ciudad y la que se encuentra en la zona rural de forma simultánea.

Esta isla de calor, es entonces, el resultado atmosférico, a escala local, de la extensión de un área urbanizada y de la población que contiene, bajo ciertas condiciones meteorológicas que facilitan esta formación. Su intensidad será mayor cuanto mayor sea el área urbana. Este argumento condujo a Jáuregui y Tejeda (2004) a hacer una adaptación de una propuesta de T. Oke (1973) para estimar la intensidad máxima (en °C) de la isla de calor a partir de la siguiente ecuación:

$$I_{Cmáxima} = 2 \log_{10} P - 8 \quad (\text{Ec. 1}),$$

Donde P es el número de habitantes.

Con este método se puede obtener un valor estimado de la isla de calor máxima. El valor obtenido sólo representa espacial y temporalmente a una zona de la ciudad pues la máxima diferencia entre la ciudad y el campo abarca un área limitada de la superficie urbana. El resto de la población que habita la ciudad no encuentra reflejada esta máxima intensidad en su entorno atmosférico.

Dado que asignar el mismo valor espacial y temporalmente a la isla de calor (es decir, el valor de la intensidad máxima) significa un incremento de temperatura generalizado espacialmente y, por tanto, alejado de la realidad, es que se utiliza aquí un método propuesto por A. Tejeda con motivo de este trabajo para asignar un valor más representativo y útil de acuerdo a las diferencias de temperatura dentro de la misma cubierta urbanizada y con respecto a la zona rural. El desarrollo de esta metodología requiere de información horaria de temperatura, población y área urbanizada de la ciudad.

Los datos

Un problema que surge al tratar datos horarios, además de la gran variabilidad que se presenta en cortos intervalos temporales, es la pérdida de registros por periodos prolongados cuyo origen suele ser la falla en el instrumental. Dejar que la falla perdure por semanas ha sido, casi siempre, un misterio sin resolver. Eso puede reducir la calidad de los resultados, siendo necesario recurrir a métodos que sustituyan valores faltantes. En este caso se llevó a cabo una selección y revisión exhaustiva de la información y se procedió a efectuar un tratamiento propuesto por O. Jitrik (colaboración personal) a partir del comportamiento observado de la temperatura en otras estaciones de la ciudad.

El método propuesto para la obtención de series completas se puede describir de la siguiente manera:

Se dispone de un conjunto de N series de tiempo I ($I = 1, \dots, N$) de cierta variable X , que corresponden a N estaciones de detección distribuidas en cierta región. Supongamos que, al menos, una serie I tiene uno o varios segmentos (cada uno de los cuales se etiqueta con el índice k) sin datos. Designando con el índice i cada uno de los datos faltantes $X_{i, k, I}$ que pertenecen al segmento k , se busca entre el resto de las series I' la que tenga completo el mismo segmento k . Si esto se consigue para más de una serie, se escoge, la serie I' que tenga el coeficiente de correlación (de Pearson) más cercano a la unidad. Se hace entonces un análisis de regresión lineal entre la serie I y la I' , encontrando la pendiente $m_{I, I'}$ y la ordenada al origen $b_{I, I'}$ entre ambos conjuntos de datos. De esta manera, los datos faltantes en el segmento k de la serie I se pueden escribir en función de los datos existentes del mismo segmento en la serie I' como

$$X_{ikl} = m_{lr} X_{ikl'} + b_{lr} \quad (\text{ec. 2})$$

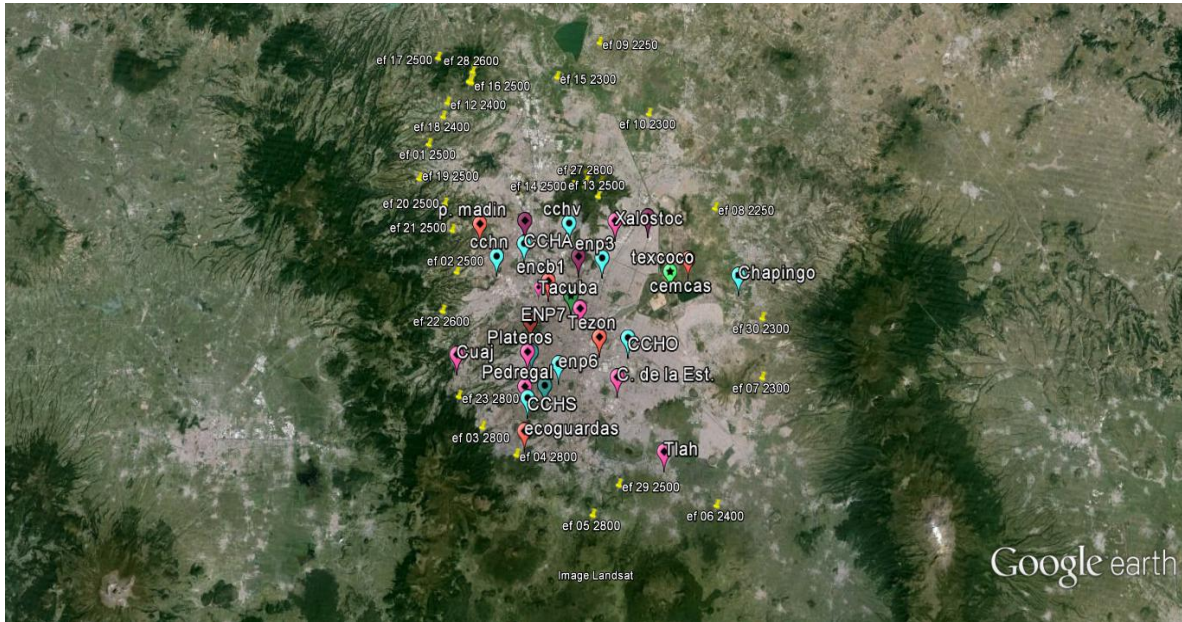
Se repite el proceso para todos los segmentos de la serie l , que puede ser rellenada de la misma manera usando otra de las series. Se sigue el mismo procedimiento todas las series. De esta manera, todas quedan completas.

Las series que se sometieron a este proceso fueron los datos horarios del año 2010 de las redes de estaciones del Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato de la UNAM (PEMBU), del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de la Red Meteorológica (RedMet, SIMAT) del Sistema de Monitoreo Atmosférico y de la red del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (CCA), sumando un total de 29 rescatadas cuya ubicación forma parte de la ZMCM, tomando en cuenta que algunas estaciones pueden estar ubicadas en las afueras de la superficie urbanizada pero dentro de la conurbación, aunque no haya una clara continuidad física. Otras estaciones se clasifican como francamente rurales.

Además, se “ubicaron” virtualmente (es decir, no existen como tal) una serie de 30 estaciones localizadas totalmente fuera de la superficie urbana con la única finalidad de proporcionar un cierre a las isotermas que comprenden toda la ZMCM y no quedaran zonas urbanizadas fuera del área de análisis. Estas “estaciones virtuales” se ubicaron a diferentes altitudes alrededor de la zona urbana entre los 2,250 y los 2,800 msnm. Las temperaturas asignadas a ellas se obtuvieron como un aproximado por diferencia de altitud:

- La estación más baja de la red de estaciones rurales reales que en este caso corresponde a CEMCAS (2,238 msnm), y la más alta en Cuajimalpa (2,754 msnm) arrojan una diferencia de altitud de 516 m.
- Se obtiene la diferencia de temperatura entre ellas según el momento o periodo que se esté considerando.
- Se asigna un valor, según la diferencia de temperatura, para cada 100 metros, haciendo extensiva esa diferencia hasta las altitudes de las estaciones ubicadas virtualmente. Es decir, por cada 100 metros arriba de CEMCAS se restará (o se agregará, según la diferencia de temperatura entre CEMCAS y Cuajimalpa) para cada estación virtual, ese valor cada 100 m.

La distribución de todas las estaciones utilizadas se muestra a continuación (Fig. 22):









PEMBU 	CCA UNAM 	SMN EMAS 	SIMAT 	Observatorios 	Virtuales 
CCA	Minería	CEMCAS	Acatlán	Tacubaya	30
CCHA	Plan Texcoco	Ecoguardas	Cuajimalpa	Col. de Geografía	
CCHN		ENCB1	C. Estrella		
CCHO		P. Madín	IMP		
CCHS		Tezontle	Merced		
CCHV			Pedregal		
ENP1			Plateros		
ENP3			San Agustín		
ENP5			Tlahuac		

Fig. 22. Ubicación de las redes de estaciones del PEMBU, SMN, RedMet (SIMAT) y CCA de la UNAM en ubicaciones urbana, suburbana, rural y estaciones virtuales. Año 2010. Fuente: ubicación sobre imagen de Google earth.

El método propuesto requiere también la utilización de información censal (INEGI, 2010) en unidades de información llamadas Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) en su

versión urbana, las cuales abarcan un indeterminado número de manzanas con información de carácter social de la población que las habita. Para esta investigación se extrajo la información referente a población y extensión de cada AGEB dentro de la ZMCM.

De esta manera se obtuvo una base de datos completa y lista para ser utilizada en la conformación de las isotermas de los periodos que servirán como ejemplo de la representación de la isla de calor, que en el caso de este análisis corresponden al año 2010, año coincidente con el censo nacional de población y vivienda.

El método

Asignar un valor a la isla de calor que no sea la máxima intensidad, como se explicó anteriormente, requiere de visualizar la relación del área ocupada por cada isoterma y la población dentro de ella. La propuesta consiste en otorgar un peso por extensión y población a cada isoterma dentro de la ciudad con el fin de obtener un valor ponderado en °C.

Para la conformación de la isla de calor y la posterior estimación de un valor representativo, fue necesario elaborar gráficamente la distribución de los promedios de temperatura de forma mensual en tres periodos a lo largo del día para el año 2010:

6:00 a 8:00	periodo de máximo enfriamiento
14:00 a 16:00	periodo de máxima temperatura
20:00 a 22:00	periodo nocturno de enfriamiento

A partir de los resultados de los promedios para cada periodo, se procede al trazo de las isotermas para cada mes con la utilización de un sistema de información geográfica (Arcview). Después del trazo de las isolíneas por interpolación, con atento énfasis en la topografía, se procede al análisis de cada isoterma. Para eso es necesario contar ya con las AGEBS urbanas, que sumaron un total de 4,798 en la ZMCM con información utilizable de cantidad de población y superficie en km² de cada una. Las AGEBS, con esta información censal provista por INEGI y un elaborado proceso de separación para cada isoterma, se manejaron como una cobertura en el sistema de información geográfica.

A partir de ahí, para cada isoterma se hace la estimación del número de habitantes y área urbana. Por ejemplo, en la Figura 23, que corresponde al mes de enero en el periodo matutino, se observan cuatro isotermas que representan temperaturas grado por grado Celsius, comenzando en los 6°C hasta 10°C. Cada una de ellas contiene cierto número de

AGEBS desde los cuales se estima la cantidad de población y la superficie que ocupan (Cuadro 5).

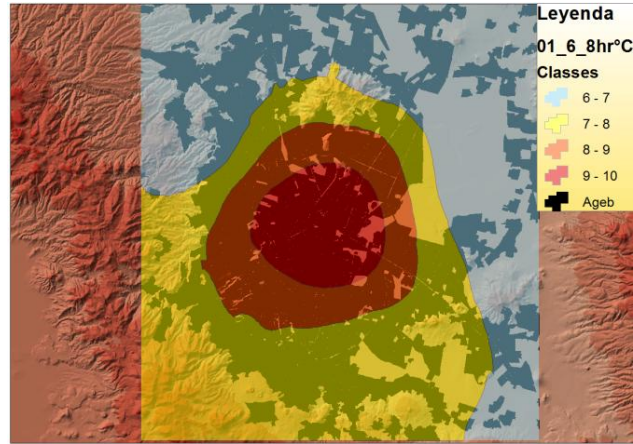


Fig. 23. Mapa de temperaturas en la ZMCM para el mes de enero del 2010. Periodo 6:00 a 8:00.

Cuadro 5. Área y población de cada isoterma de la Figura 23.

Isoterma °C	Área que ocupa en km ² de superficie urbana	Población urbana
6 -7	351.0	3,421,216
7.1 - 8	405.0	5,590,476
8.1 - 9	241.6	4,402,164
9.1 - 10	138.6	3,014,754

El procedimiento se realizó para cada mes en los tres periodos de horas elegidos.

Una vez se obtienen las tablas con la información para cada mes, se puede estimar el valor representativo de la isla de calor que no es el valor máximo urbano-rural, sino ponderado por área y población. La propuesta para esta ponderación es la siguiente:

$$ICP = \frac{(\Delta T_{1,2} A_{1,2} h_{1,2} + \Delta T_{1,3} A_{2,3} h_{2,3} + \dots + \Delta T_{1,f} A_{f-1,f} h_{f-1,f})}{(A_{Total} h_{Total})}$$

(Ec. 3)

Donde: Los subíndices indican las isotermas, 1 para la central y f para la final o periférica.

ICP intensidad de la isla de calor ponderada en °C

h_i población de cada isoterma

A_i área de cada isoterma

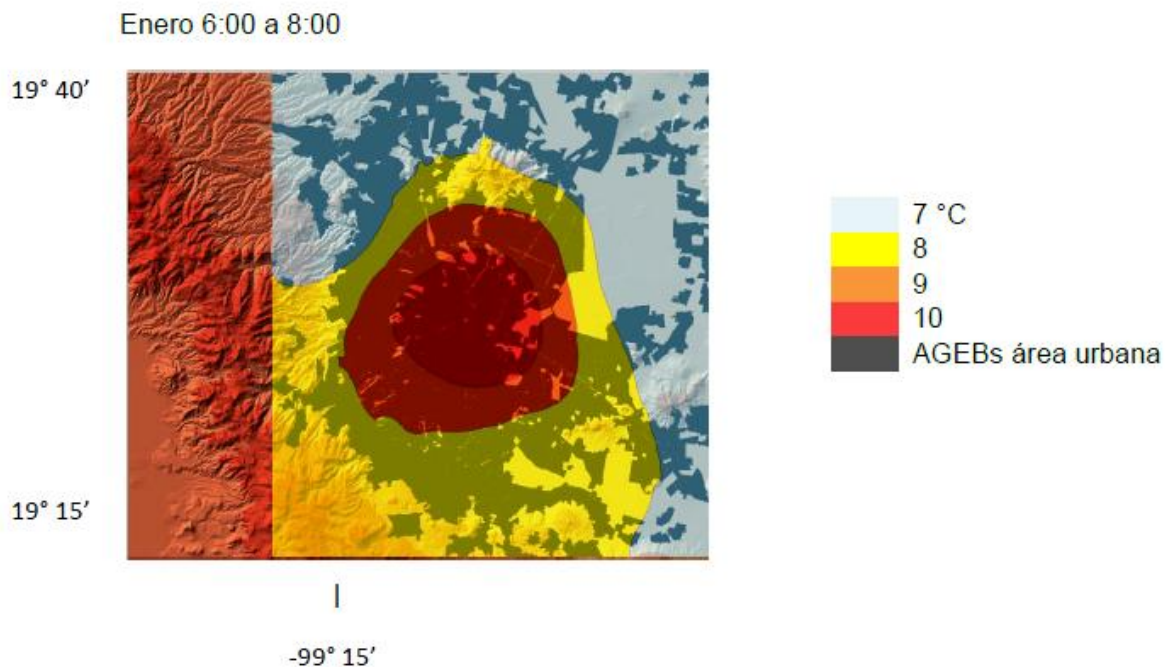
A_{Total} área de la zona metropolitana del total de AGEBS urbanos (1,341 km²)

H_{Total} población del área metropolitana del total de AGEBS urbanos (18,422,016 habitantes)

Se efectuó la ponderación para cada mes en los tres periodos de horas considerados para el año 2010. Los resultados que se obtuvieron se muestran a continuación.

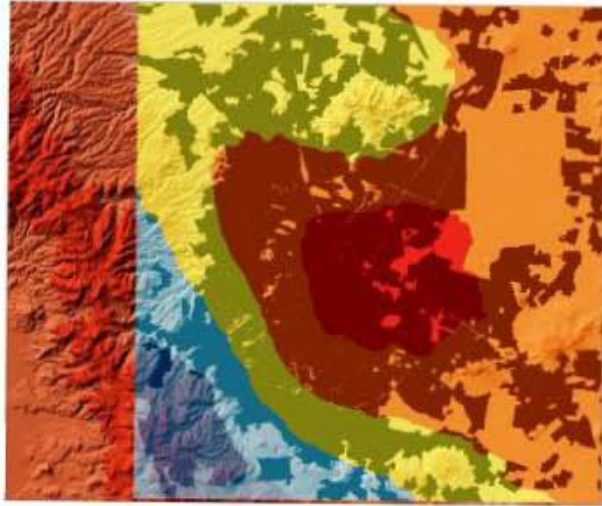
Resultados

Se elaboraron un total de 36 mapas de temperatura (todo el año 2010 en los tres periodos de horas), de los cuales se muestran algunos ejemplos representativos para la estación fría-seca (enero), cálida seca (mayo) y cálida húmeda (julio) (Fig. 24):



Enero 14:00 a 16:00

19° 40'

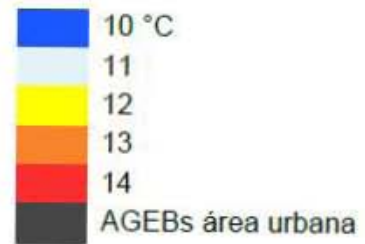
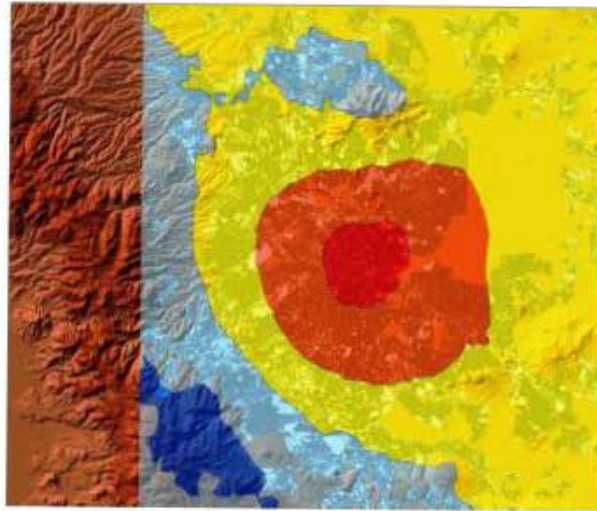


19° 15'

|
-99° 15'

Enero 20:00 a 22:00

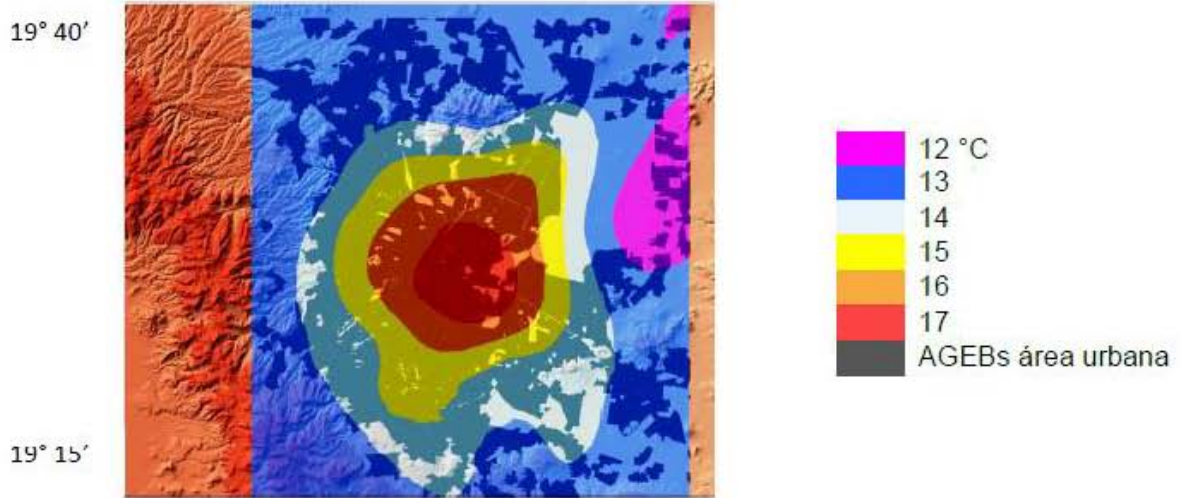
19° 40'



19° 15'

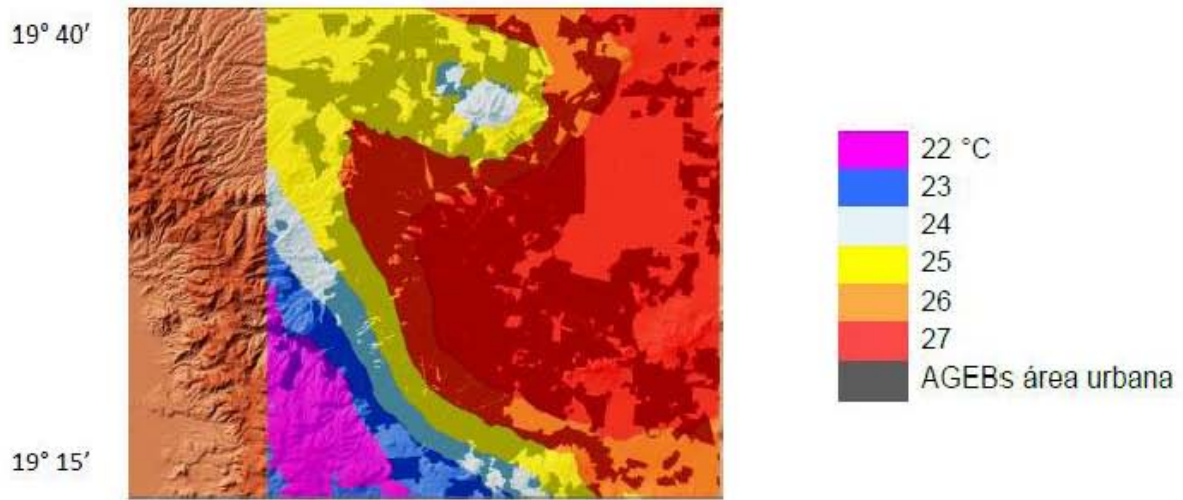
|
-99° 15'

Mayo 6:00 a 8:00



|

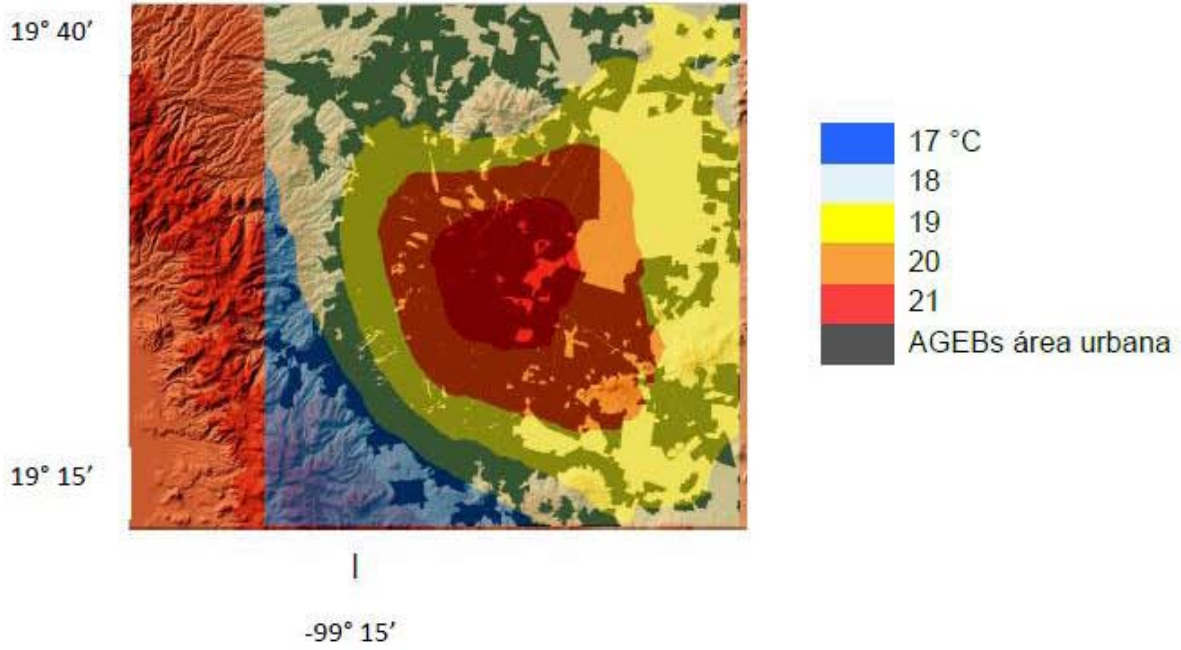
Mayo 14:00 -99° 15'



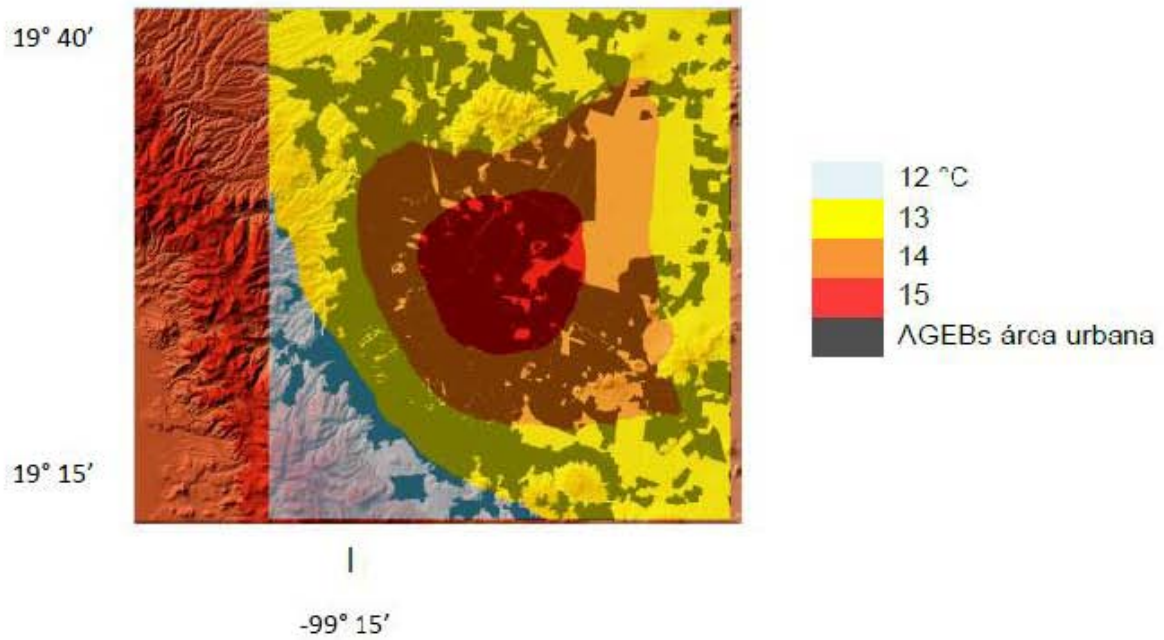
|

-99° 15'

Mayo 20:00 a 22:00



Julio 6:00 a 8:00



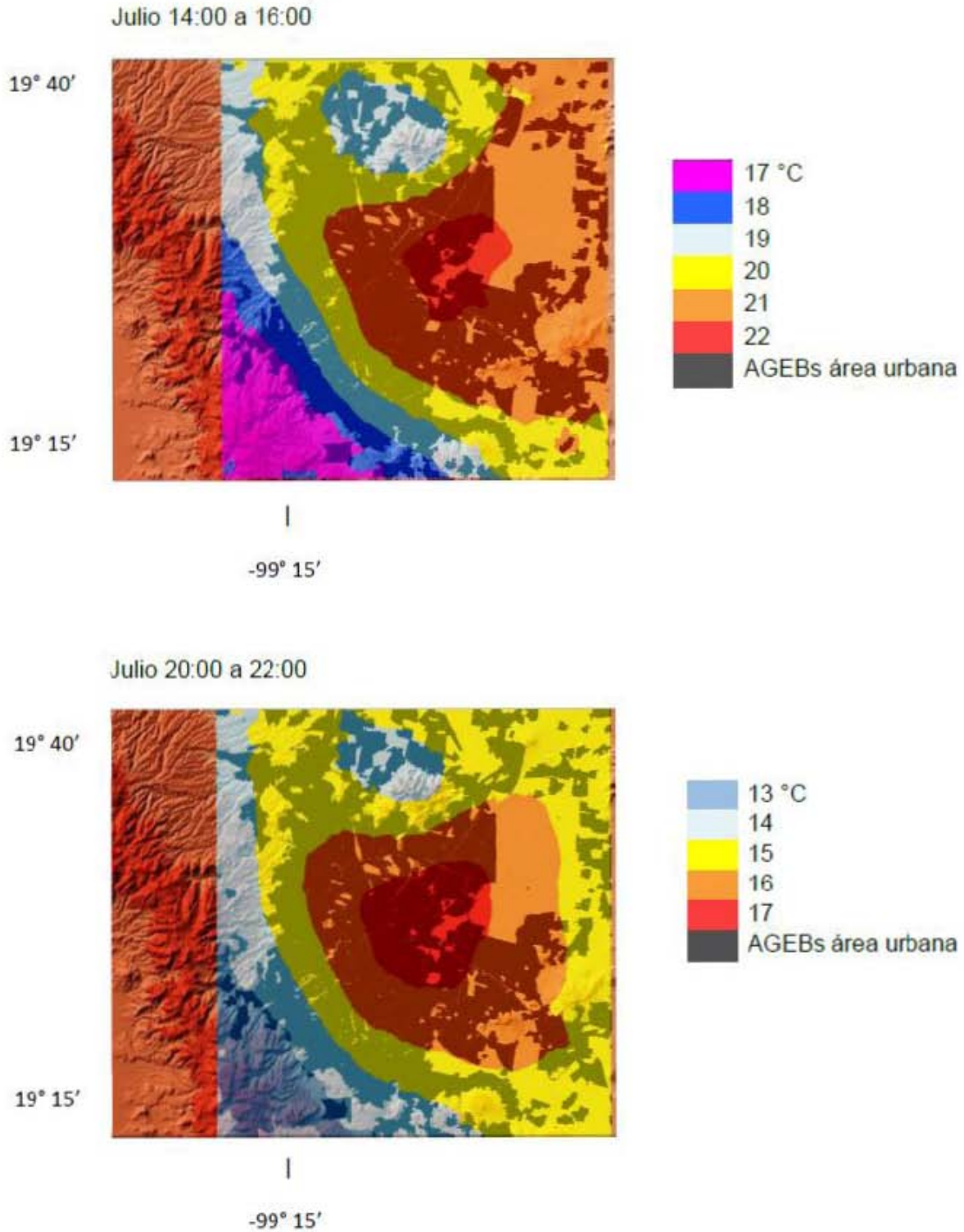


Fig. 24. Mapas de temperaturas en la ZMCM para enero, mayo y julio en tres diferentes periodos del día: 6:00 a 8:00, 14:00 a 16:00 y 20:00 a 22:00. Año 2010.

La ponderación obtenida para una isla de calor representativa para cada mes en cada periodo queda resumida en el Cuadro 6:

Cuadro 6. Resultado de la estimación de la isla de calor ponderada por población y área en km² de la distribución de la temperatura promedio mensual para tres periodos en el día. Año 2010.

mes	periodo horario	I de C ponderada
enero	6:00 a 8:00	0.6
	14:00 a 16:00	1.3
	20:00 a 22:00	1.2
febrero	6:00 a 8:00	1.4
	14:00 a 16:00	1.3
	20:00 a 22:00	0.8
marzo	6:00 a 8:00	0.5
	14:00 a 16:00	1.3
	20:00 a 22:00	1.0
abril	6:00 a 8:00	0.5
	14:00 a 16:00	1.4
	20:00 a 22:00	1.0
mayo	6:00 a 8:00	0.8
	14:00 a 16:00	1.8
	20:00 a 22:00	0.8
junio	6:00 a 8:00	0.7
	14:00 a 16:00	1.7
	20:00 a 22:00	1.1
julio	6:00 a 8:00	0.9
	14:00 a 16:00	1.4
	20:00 a 22:00	1.0
agosto	6:00 a 8:00	0.8
	14:00 a 16:00	1.3
	20:00 a 22:00	0.8
septiembre	6:00 a 8:00	0.9
	14:00 a 16:00	1.5
	20:00 a 22:00	1.1
octubre	6:00 a 8:00	1.0
	14:00 a 16:00	1.6
	20:00 a 22:00	0.6
noviembre	6:00 a 8:00	0.8
	14:00 a 16:00	1.6
	20:00 a 22:00	0.8
diciembre	6:00 a 8:00	0.5
	14:00 a 16:00	1.3

Este valor ponderado de la isla de calor representa, por población y distribución espacial de la temperatura, un valor distinto al que proporciona la máxima intensidad ciudad-campo. La idea es la de poder agregar este valor a los registrados por mediciones instrumentales dentro de la ciudad sin incurrir en el defecto de ignorar la presencia del fenómeno térmico urbano o de, igualmente, en el defecto de agregar la máxima intensidad, la cual no representa a la totalidad de la ciudad. Los valores obtenidos en este ejercicio para el año 2010, serán utilizados como representativos del comportamiento térmico de la ZMCM en estimaciones del bioclima en escenarios base y futuros, los cuales se analizan en el capítulo 5 de este trabajo.

Las condiciones del clima y la afectación por efecto de las ciudades, mostrado en este capítulo, significan modificaciones en el ambiente salubre de los habitantes. El avance de la cubierta urbana, aun con el desaceleramiento del crecimiento de la población, implica la necesidad de conocer mejor los mecanismos del comportamiento térmico, ya que pueden significar una enorme diferencia ambiental al combinarse con los efectos de mayor escala.

El efecto de la isla de calor no representa por sí mismo un peligro directo, pero puede contribuir como un factor que incida en las condiciones sanitarias y de confort. Con este motivo, se analizará, junto con la precipitación, como un posible peligro climático a los que la población de la ZMCM se enfrenta de cara al cambio climático global.

4. Principales peligros hidroclimáticos y térmicos para la ZMCM

En este capítulo se aborda el tema de los episodios climáticos extremos de precipitación y temperatura en la ZMCM. Por una parte se analiza la precipitación y su posible vínculo con la ocurrencia de desastres en zonas distintas de la ciudad. Por otro lado se elabora un análisis estadístico de temperatura para cuatro años climáticamente singulares y su posible relación con la mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio y del sistema respiratorio. Con esta evaluación se pretende identificar un umbral tanto en las temperaturas máximas como en las mínimas que marquen una diferencia en las tendencias de muerte por ambos tipos de enfermedades.

4.1 Frecuencia e intensidad de los eventos hidroclimáticos y térmicos

La ZMCM posee un clima, como se ha dejado ver en los capítulos anteriores, casi ideal. El temperamento tropical por su ubicación se atenúa con la altitud dando como resultado un sitio templado con lluvias sólo en una mitad del año. Sin embargo, al igual que el resto de la superficie terrestre, la ciudad se encuentra sometida, acorde con su ubicación, no sólo a la influencia de los sistemas de mayor escala, sino también a la influencia del suelo y sus características particulares. Esta influencia por efecto de la superficie, puede potenciar los efectos de la variabilidad climática normal, tornando en extremos algunos episodios atmosféricos. Las ciudades son una referencia directa de esta influencia, y los efectos de la variabilidad climática normal en connivencia con el cambio drástico en el uso del suelo pueden convertirse en un peligro, en una amenaza que cause un impacto en la población debido a su posible condición de vulnerabilidad. Es decir, los episodios atmosféricos adquieren otra perspectiva cuando se trata de que ocurran en ciudades, más cuando se trata de macro ciudades que han tenido un crecimiento acelerado, y más aún si, además, se ubican en países en vías de desarrollo.

La ocurrencia de un episodio atmosférico se consideraría extremo no sólo porque estadísticamente salen de la normalidad, sino por los estragos que causan en la población. El término *extremo*, entonces, tendría también ese significado por apreciación del impacto sobre la ciudad. Además, las características de un episodio que se considera extremo en un lugar, puede resultar que forma parte la normalidad en otro, y no representa nada extraña su ocurrencia. Los principales fenómenos meteorológicos cuyos extremos han afectado a la humanidad con resultados desastrosos han sido, como se había comentado, los relacionados con la precipitación y la temperatura.

La idea principal radica en que la ocurrencia de episodios atmosféricos extremos, producto de la variabilidad climática normal, revela una falta de adaptación por parte de la

población asentada de forma inconveniente, por lo que forzosamente se encuentra también sin recursos suficientes para adaptarse a un cambio climático más drástico en el futuro.

En un lugar como la ZMCM, con un área aproximada de 2000 km² de superficie y una ubicación que abarca de la zona baja de la cuenca hasta zonas de piedemonte del poniente, el sur y otras elevaciones en el norte o aisladas al oriente, los fenómenos meteorológicos suelen no suceder en toda el área edificada al mismo tiempo, cuando menos las precipitaciones y otros de origen acuoso, y las temperaturas responden a las diferencias de altitud y al uso de suelo. Se encontrarán, entonces, diferencias sustanciales de un sitio a otro dentro de la misma superficie urbanizada debido a que, por sus dimensiones, ocupa zonas diversas físicamente hablando. La ocurrencia de episodios extremos, en cuanto a la frecuencia, puede ser diferente (incluso marcadamente diferente) según las características físicas donde se haya asentado la ciudad. La zona urbana asentada en el piedemonte al poniente de la cuenca se verá afectada, por ejemplo, de una mayor frecuencia de precipitaciones, mientras que la zona oriente sufrirá de mayores episodios de sequía. También por sus dimensiones, la ciudad, en la misma zona poniente, puede presentar un episodio severo en un área reducida, mientras que en el resto de la zona sea sólo una precipitación normal, y en el resto de la ciudad prevalezcan condiciones secas.

Definir en los fenómenos meteorológicos lo que es extremo, o descartarlo como tal, no es sencillo. Los eventos extremos van a estar definidos de acuerdo a la climatología de cada lugar. Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (2007) (IPCC, por sus siglas en inglés) se define un evento extremo, estadísticamente, como aquel que se encuentra por encima del 90th percentil o por debajo del 10th percentil de una distribución de alguna variable observada como puede ser la temperatura o la precipitación. Esto significa que son eventos "raros" los cuales se localizan en las "colas" de la distribución (López-Díaz, *et al*, 2014).

Si los eventos extremos llegan a ser tan frecuentes, se convertirán en una normalidad y habrá que esperar entonces episodios extremos a partir de los extremos. Pero una simple apreciación no tiene el sustento necesario para evaluar si estos eventos están cambiando, por lo que se ha recurrido a la utilización de índices para caracterizarlos.

Los índices describen características particulares de los extremos que incluyen frecuencia, amplitud y persistencia. Se pueden clasificar en a) índices de percentiles, los cuales muestran los extremos de una distribución (los deciles 10o y 90o); b) índices absolutos, que representan los valores máximos y mínimos en una temporada o año; c)

índices con umbrales, definidos como el número de días en el cual un evento cae sobre o por debajo de un valor (o umbral) fijo; usar un umbral fijo, depende de la región bajo estudio, ya que este umbral puede ser muy específico de sus condiciones climáticas regionales y de los sistemas bajo estudio; d) índices de duración, que van a definir periodos de tiempo con cierta duración y características climáticas, (López-Díaz, *et al.*, 2014). La mayor parte de los índices, definidos por el Equipo de Expertos en Índices y Detección de Cambio Climático dentro de la WMO, definieron 27 básicos relacionados con los factores que más inciden en la ocurrencia de desastres a nivel mundial: la temperatura y la precipitación (López-Díaz, *et al.*, 2014).

Al igual que en la mayor parte del mundo, en la ZMCM, los episodios meteorológicos extremos se refieren principalmente a los de precipitación y temperatura, convirtiéndose en los fenómenos hidrometeorológicos más peligrosos para la ciudad. La percepción generalizada es que las lluvias son cada vez más intensas y los periodos cálidos cada vez más frecuentes pues han generado desastres a grandes núcleos de población y, por lo tanto, pérdidas económicas. Sin embargo esta apreciación puede estar sesgada debido a la presencia cada vez mayor de sitios vulnerables propicios al desastre que a una mayor frecuencia de episodios extremos.

El impacto de estos fenómenos extremos en la población, como se ha tratado ya en este trabajo, dependerá de la forma de urbanización. Sin embargo, todo modelo de desarrollo urbano genera consigo diversos modos o tipos de riesgos y su materialización en desastres (López-Peláez y Pigeon, 2011).

4.1.1 Peligros por precipitación

La precipitación en la ZMCM es de tipo monzónico (con seis meses de lluvias y seis de secas) ubicado el periodo húmedo en la mitad cálida del año (Jáuregui, 2000). A su vez, dentro de la cuenca se encuentran zonas secas y zonas húmedas. Dentro de la ciudad misma, localizada en la parte centro-poniente de la cuenca de México, los episodios lluviosos suelen presentarse de manera diferenciada en toda la extensión urbana.

La ubicación de la ZMCM en las zonas que se han asentado en el piedemonte del sur y el poniente, marcan episodios de lluvia más intensos y frecuentes en la serranía de Las Cruces, del Chichinautzin y Ajusco. La frecuencia e intensidad de la precipitación se ha relacionado directamente con la orografía, en un inicio, y posteriormente con las características del suelo en una superficie drásticamente modificada por la urbanización.

Además de las tendencias de la precipitación encontradas (ascendentes o bien sin tendencia alguna en el total anual para diferentes zonas de la ciudad según diversos autores como Jáuregui, 1974; Aquino, 2012; Martínez, 2011), la intensidad de los aguaceros y la frecuencia en que se presentan causan un impacto también diferenciado en la población. Es de esperar que estos episodios funjan como detonantes de desastres, sin embargo, algunos de los eventos más severos no han significado forzosamente la ocurrencia de un desastre, y en cambio eventos menos severos han desencadenado inundaciones, procesos de remoción en masa y deterioro generalizado. La vulnerabilidad del sitio es la clave.

El Sistema de Aguas de la ciudad de México (SACMEX) a través de la *Unidad Tormenta*, estableció el programa de “semáforo de alerta por lluvias” basado en la observación de las afectaciones en vialidades y viviendas. Este programa tiene como objetivo informar a la población en tiempo real sobre la intensidad de la precipitación y crear una alerta sobre el posible impacto de los chubascos. Los intervalos considerados en el semáforo son como sigue (Fig. 25):

Precipitación en mm	Intensidad
0 a 5	Muy baja/ o ligera
6 a 15	Baja/Ligera-Regular
16 a 30	Media/Regular-Fuerte
31 a 50	Alta/ Lluvias fuertes a tormentas
>50	Muy Alta/ Tormenta intensa o torrencial

Fig. 25. Semáforo de alerta por lluvias establecido por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

Con la utilización de la red de estaciones de la antes conocida como DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica) ahora en manos del SACMEX, se ha separado en los intervalos del “semáforo de alerta” a la precipitación diaria (total en 24 horas) de 49 estaciones pluviométricas del periodo 1988-2008. Los resultados son coincidentes con lo encontrado en otros trabajos dedicados a la lluvia en la Ciudad de México (Aquino, 2012; Magaña, 2003; Jáuregui, 1974), donde la mayor precipitación se

presenta en la montaña y zonas de pie de monte, disminuyendo conforme la ciudad se asienta en las partes bajas y planas de la cuenca.

La altitud explica casi siempre la frecuencia de la precipitación, e incluso la frecuencia de los episodios intensos, con una correlación de 0.84 con la precipitación total anual. La Figura 26 a continuación muestra las estaciones hidrometeorológicas con el número de días con episodios mayores a 50 mm en 24 hr para un periodo de 21 años. Es lógico apreciar cómo se localizan en las zonas elevadas las precipitaciones más intensas (**mayores a 50 mm**), sin embargo algunas estaciones no ubicadas en la montaña han registrado un importante número de episodios severos, como son San Joaquín y El Triángulo, en la delegación Miguel Hidalgo.

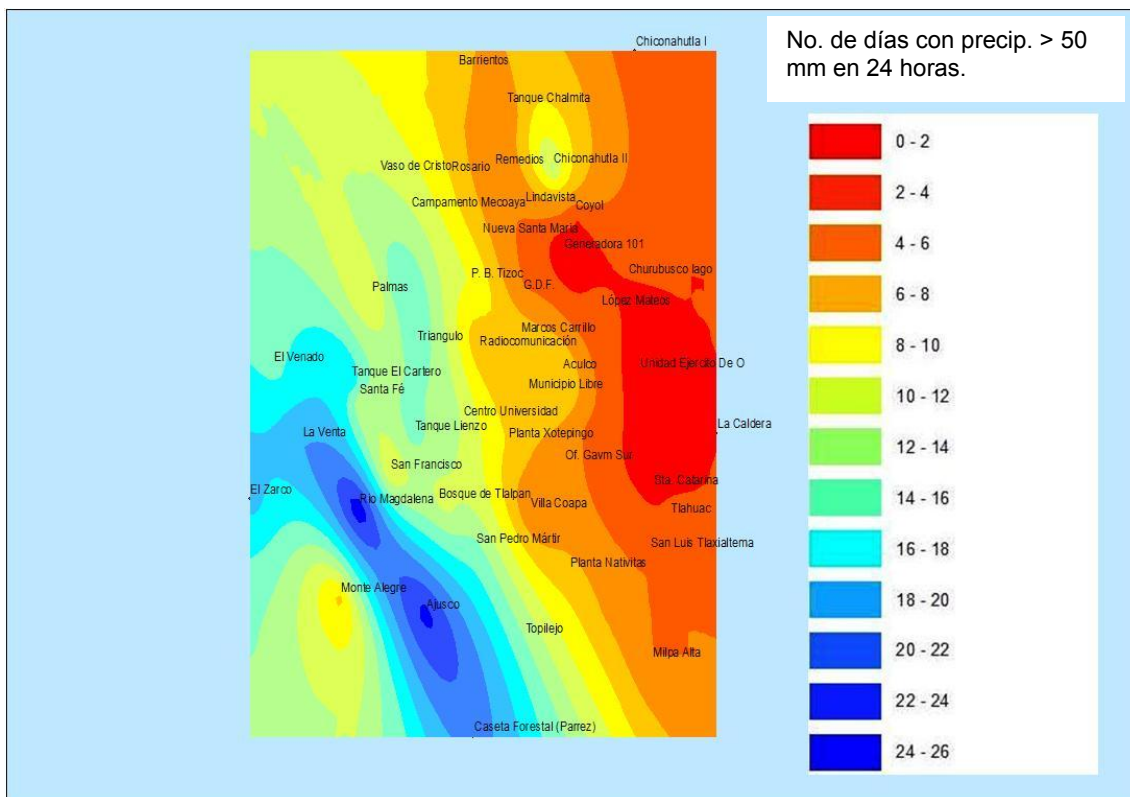


Fig. 26. Número total de eventos de precipitación mayores a 51 mm/24h durante el periodo 1988-2008. Fuente: Elaboración propia con datos de las estaciones de la DGCOH (hoy SACMEX).

El análisis de los datos registrados en las estaciones pluviométricas de la DGCOH en el periodo 1998 - 2008, muestra que este tipo de lluvias torrenciales se presentó 164 veces, tomado como una sola vez en 24 horas en toda la ciudad (un solo episodio por día aunque hubiese abarcado más de una estación). En promedio, se trata de casi 8

episodios extremos por año. Sin embargo no se detecta ninguna tendencia a lo largo del periodo (quizá demasiado corto para tal fin).

En cuanto a episodios de menor intensidad, aunque alta (de *precipitaciones fuertes a tormentas* con **31 a 50 mm en 24 horas**) en el semáforo de alerta por lluvia, en el poniente de la ciudad (como es en la delegación Cuajimalpa), se registró en el periodo 1998-2008 casi siete veces la frecuencia de los ocurridos en la planicie de la cuenca (oriente de la ciudad).

El registro de los 164 episodios de **tormenta extrema o torrencial (mayores a 50 mm)** en el periodo de 21 años analizados, representa menos del 1% del total de las precipitaciones apreciables (mayores a 5 mm), mientras que el rango entre **16 y 30 mm por día (lluvias fuertes a tormentas)** representa escasamente un 5% del total. El resto del registro consta de lluvias de baja o regular intensidad.

La ocurrencia de episodios lluviosos con mayor o menor intensidad es interesante de estudiar como fenómenos en sí, pero adquieren una importancia vital cuando afectan sitios habitados. En el caso que nos ocupa, ocurren en una de las urbes más pobladas y complejas del mundo. Vincular episodios extremos con desastres en la ciudad, o bien desastres en la ciudad con episodios extremos, no siempre significa lo mismo. La ocurrencia de episodios extremos de precipitación casi siempre va relacionada con desastres en poblaciones vulnerables, aunque los desastres por precipitación podrán ocurrir independientemente de la presencia de episodios extremos.

Una fuente de datos importante para el conocimiento de los desastres es DESINVENTAR. Incluso se han agregado algunos países de África y Asia. A su vez, la fuente de datos utilizada por DESINVENTAR son los registros hemerográficos de cada ciudad, donde dejan plasmada la ocurrencia de desastres a pequeña y gran escala. Esta vastísima base de datos ha sido desarrollada por LA RED y la Corporación OSSO de Colombia. Se puede visitar en <http://www.desinventar.org/>.

A pesar de que DESINVENTAR es útil para identificar los principales desastres, su efectividad se ve limitada al basarse en el registro hemerográfico que documenta, lógicamente, los sitios más importantes de la ciudad por su dinámica económica, financiera y habitacional densa. Las zonas de menor relevancia captan en menor medida la atención de los medios, por lo que no hay una completa difusión de información de poblaciones afectadas cuya importancia es relativa al carecer de valor comercial y ser socialmente más marginados.

Además, el registro de eventos de desastres bajo el criterio de DESINVENTAR, carece de un rigor para diferenciar causas de efectos, por lo que se procedió a realizar una reclasificación más precisa de los efectos hidrometeorológicos y térmicos. Esta reclasificación está basada en las originales de DESINVENTAR publicadas ahí como: Tipo de evento, Observaciones de eventos, Tipos de causa y Observaciones de causa. La clasificación de efectos modificada separó el origen (meteorológico, en este caso) y los efectos resultantes de la incidencia de los fenómenos hidrometeorológicos. Esta exhaustiva revisión condujo a reconocer los desastres en una variedad de efectos, como se muestra en el Cuadro 7:

Cuadro 7. Reclasificación de desastres y sus causas por eventos climáticos a partir de la clasificación propuesta por DESINVENTAR. Fuente: elaboración propia.

Efectos	Causas
accidentes de aviación	neblina, lluvia
accidentes de tránsito	lluvia, helada, neblina
accidentes ferroviarios	lluvia
afectaciones en aeropuerto	nevadas, neblina, lluvias
apagones	lluvia
avenida torrencial	lluvia
caída de árboles	vendaval
caos generalizado por inundaciones, falla en el suministro eléctrico,	lluvia, vendaval
cortes en energía eléctrica	vendaval
derribamiento de árboles	vendaval
derribamiento de árboles y cortes de energía, caos vial, derrumbes	vendaval
derribamiento de espectaculares	vendaval
derrumbes en edificaciones	vendaval
derrumbes en edificaciones con víctimas	vendaval
derrumbes y viviendas afectadas	lluvias, viento
deslizamientos	lluvias
enfermedades gastrointestinales	altas temperaturas
enfermedades respiratorias	bajas temperaturas
fallas en energía eléctrica, accidentes, derribamiento de árboles	granizo
fallas en energía eléctrica y caos vial	granizo

fallas en energía eléctrica, caída de bardas y encharcamientos	granizo
inundación	lluvias, granizo
personas afectadas y decesos por frío	bajas temperaturas
personas y vialidades afectadas por nevadas	nevadas
raционamiento de agua	sequía, altas temperaturas
tolvanera	vendaval
víctimas por caída de rayos	tormenta eléctrica

A partir de esta reclasificación fue posible identificar con mayor precisión las causas y efectos de los fenómenos hidrometeorológicos en la Ciudad de México. La revisión de los registros mostró que la precipitación es la principal causa de desastres en diversas manifestaciones (granizo, lluvia), y cuyos principales efectos son las inundaciones que causan un deterioro en la infraestructura y la salud de los habitantes. Las lluvias, al ser intensas o prolongadas, ocasionan procesos de remoción y derrumbes en los cerros habitados generalmente por colonias con asentamientos irregulares.

En los últimos años, se ha agregado a los desastres provocados por lluvias, la caída de anuncios espectaculares y árboles los cuales arrastran los cables de energía eléctrica causando apagones y caos generalizado. Los vientos en ráfagas y la intensa lluvia pueden ser una consecuencia, como se dijo anteriormente, de la forma en que el calor urbano se relaciona con la intensificación de la lluvia (Jáuregui y Romales, 1996; Selover, 1997; Bornstein y Lin, 2000; Thielen *et al.*, 2000).

Las entidades político-administrativas de la ZMCM más afectadas por inundaciones y deslaves se pueden observar en las Figuras 27 y 28.

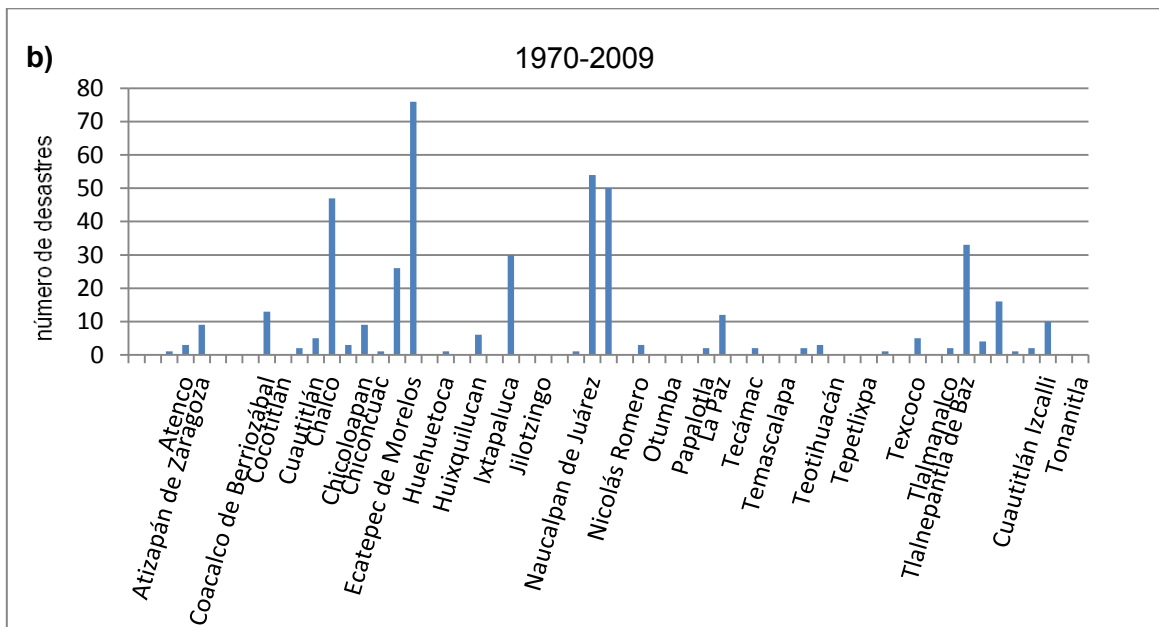
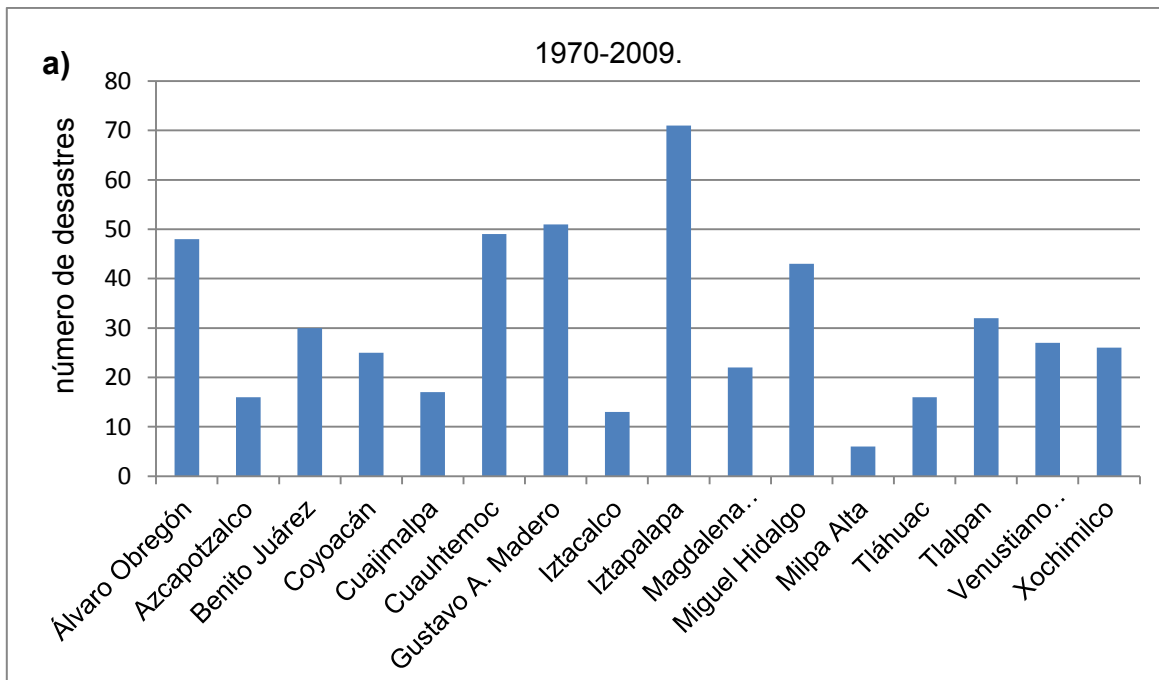


Fig. 27. Número de inundaciones en **a)** las delegaciones del D.F. y **b)** en los municipios que forman parte de la ZMCM. Periodo 1970-2009. Fuente: elaboración propia con datos de DESINVENTAR.

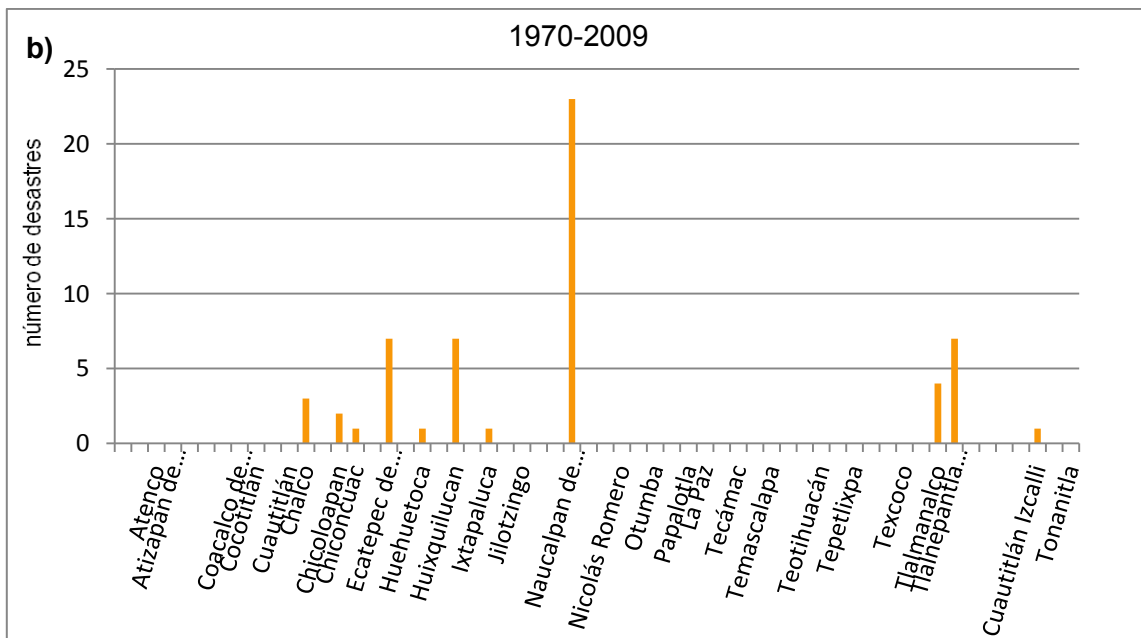
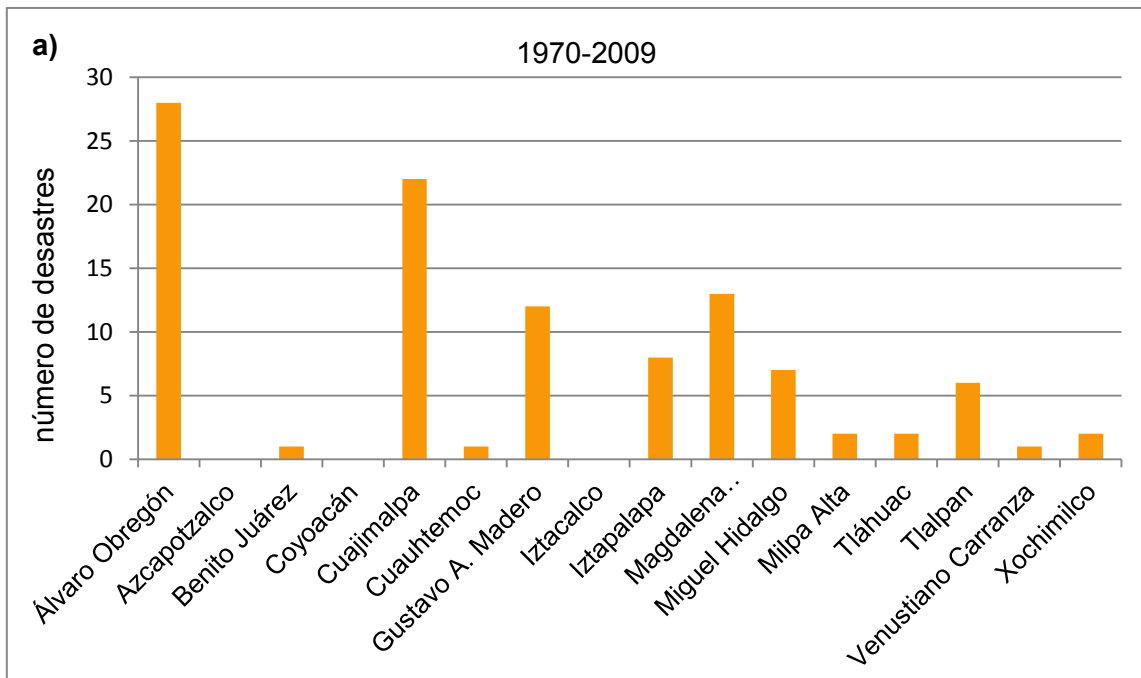


Fig. 28. Número de deslizamientos de tierra por lluvias en a) las delegaciones del D.F. y b) en los municipios que forman parte de la ZMCM. Periodo 1970-2009. Fuente: elaboración propia con datos de DESINVENTAR.

Ahora bien, vincular directamente episodios de precipitación con desastres ocurridos no ha aportado los resultados que se esperaban. Parecía evidente encontrar un elevado número de afectaciones en la población por la ocurrencia de episodios extremos. Las razones de esas discrepancias pueden ser varias, entre ellas:

- Que los desastres ocurran en sitios donde no hubiera ningún instrumento que midiera la precipitación, por lo tanto no existe registro de su intensidad.
- Que los desastres ocurran en sitios donde la precipitación no fue intensa y sin embargo son zonas receptoras del caudal precipitado en otro lado.
- Que los desastres sucedan en zonas poco o no vulnerables y tengan, por lo tanto, una infraestructura adecuada y un nivel socioeconómico, generalmente medio o alto.
- Que, a pesar de la presencia de episodios extremos, las zonas socioeconómicamente en desventaja hayan encontrado la manera de resistir el embate de las precipitaciones intensas. Por supuesto, con algunas adaptaciones que no significan una verdadera adaptación estructurada.
- Que la existencia de desastres sin episodios de precipitación severos se deban, por ejemplo, a la ineficacia del sistema de alcantarillado o a la basura acumulada en las coladeras, lo cual es una muestra del rezago cultural de la población vulnerable.

En un ejemplo de vinculación de episodios de alta (30 a 50 mm por día) y muy alta intensidad (> a 50 mm por día) con la ocurrencia de desastres, se tomaron a las estaciones pluviométricas ubicadas en la zona de montaña al poniente y surponiente de la ciudad, como es la delegación Álvaro Obregón (4 estaciones), en comparación con las estaciones ubicadas en la planicie o zona baja de la cuenca, como es la delegación Iztapalapa (5 estaciones) (Cuadro 8).

Cuadro 8. Tabla comparativa, en porcentajes, de desastres vinculados directamente a episodios de precipitación durante el periodo 1988-2008. Fuente: elaboración propia con datos de la DGCOH y DESINVENTAR.

	Episodios de precipitación < a 31 mm por día	Episodios de precip. de 30 a 50 mm por día	Episodios > a 50 mm por día
% Desastres en Álvaro Obregón	55	33	12
% Desastres en Iztapalapa	87	11	1

El número total de desastres vinculados a episodios de precipitación es casi igual en ambas zonas (69 en Álvaro Obregón y 70 en Iztapalapa), sin embargo en Iztapalapa el mayor número de desastres corresponde a la ocurrencia de precipitaciones de menor intensidad en este comparativo. La Figura 27 la coloca como la zona con mayor ocurrencia de inundaciones, cuando en realidad muestra una bajísima o nula incidencia de tormentas intensas o torrenciales (estaciones Aculco, Ejército de Oriente, Municipio Libre, Pta. Cerro de la Estrella y Of. Gavm Sur) (ver Fig. 26). A su vez, Iztapalapa, contradictoriamente, es la zona seca (con mayor racionamiento de agua y la que tiene es de mala calidad, <http://www.sinembargo.mx/24-07-2015/1426441>) que sufre de más inundaciones.

A pesar de que las inundaciones son el desastre (en los parámetros de la base de datos de DESINVENTAR) más recurrente, y la delegación de Iztapalapa la que más los sufre, no es la zona registrada con mayor número de efectos adversos a los fenómenos meteorológicos. La delegación Álvaro Obregón encabeza la lista como mayormente afectada, seguida de cerca por la misma Iztapalapa y la delegación Cuauhtémoc. En los municipios del Estado de México comprendidos en la ZMCM como Ecatepec de Morelos, Naucalpan, Chalco y Nezahualcóyotl, se registra el mayor número de desastres por hidrometeoros.

Las autoridades del SACMEX aseguran que en la ciudad de México ya no hay inundaciones, sino sólo encharcamientos (comunicación personal de Miguel Ricaño, director de Fortalecimiento Institucional de SACMEX). Aunque el drenaje ya no es suficiente, se trata de una situación que no es nueva y se debe al crecimiento desordenado de la ciudad. La eficiencia de los sistemas hidráulicos se ve rebasado, agregando además que el terreno sufre reacomodos debido a las características del subsuelo.

Los estudios de cambio climático que tratan con los impactos en el sistema de drenaje de las ciudades son todavía limitados pues requieren de una atención especial en las cuencas de pequeña escala de las ciudades y del estudio de las precipitaciones extremas de corta duración (Willems, 2012).

En general, se puede apreciar que los grupos de población desfavorecidos económica y socialmente, habitan también las partes más desfavorecidas físicamente (Satterthwaite *et al.*, 2009) como son, en el caso de la ZMCM, las laderas en las montañas con posibilidades de deslave (como en las delegaciones Álvaro Obregón, Cuajimalpa y el municipio de Naucalpan, Fig. 28a y b), el fondo inundable del valle (delegaciones Iztapalapa y Gustavo A. Madero, Fig. 27a) o las zonas naturalmente más áridas. En el

centro de la ciudad, que no es necesariamente el centro de la cuenca, los desastres por inundaciones suelen ser más visibles y mediatizados (Delegación Cuauhtémoc), sin que signifique que sea una zona con una mayor ocurrencia ni de episodios extremos ni de desastres.

4.1.2 Peligros por temperatura

Los peligros que la población percibe como una amenaza mayor a su sobrevivencia en esta ciudad son, en primer lugar, la ocurrencia de sismos, cuya escala de tiempo dentro de los desastres ocupan sólo unos segundos de duración, sin embargo los efectos devastadores han durado años. Esta amenaza atenúa el rigor de otros causantes de desastres, en una escala de mayor duración (horas o días), y cuyos efectos pueden rebasar la capacidad de la ciudad para sobreponerse rápidamente. Se hace referencia, entonces, a las amenazas climáticas.

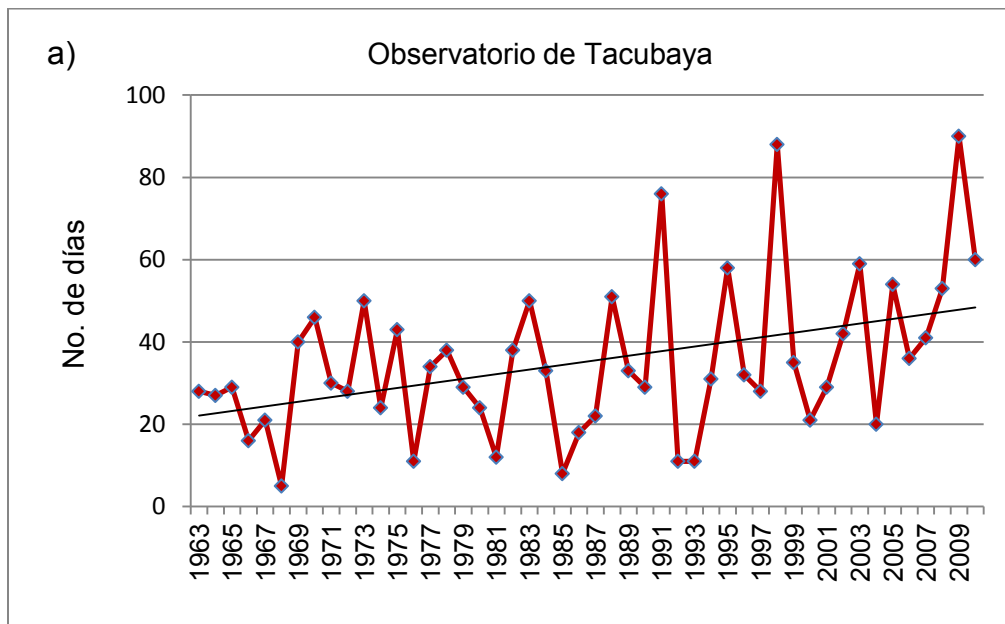
Los estudios de clima en las ciudades, como se comentó anteriormente, han tenido un impulso importante para la caracterización de los fenómenos meteorológicos, los riesgos y la vulnerabilidad ante episodios extremos. El interés se basa en la mayor proporción de población urbana y en la ocurrencia de eventos de desastre debidos a eventos extremos y no extremos. La temperatura en las ciudades es un tema dentro de estas investigaciones, vinculada principalmente a la mayor frecuencia de días cálidos anómalos, a las bajas temperaturas y a la morbilidad y mortalidad de sus habitantes.

En el Observatorio de Tacubaya, ubicado en el poniente de la ciudad y con un registro de largo periodo (1877-2014), no se han registrado, en los últimos años, temperaturas más altas históricamente hablando, sino que altas temperaturas que se han presentado en años anteriores ahora ocurren con mayor frecuencia, con la posibilidad de ser rebasadas en algún momento. La temperatura máxima histórica ha sido de 33.7°C en los años 1927 y 2009; se han alcanzado los 33.5°C en 1933, 1989, 1998 y 2003. La máxima histórica se presentó con 82 años de diferencia, sin embargo temperaturas cercanas se han registrado con mayor frecuencia en las últimas décadas, como también se puede observar más adelante en la Figura 32.

En el Observatorio del Colegio de Geografía, en la UNAM, de periodo más corto (1963-2014), la máxima temperatura del periodo de registro fue de 33.9°C en 1998, año de El Niño particularmente intenso, y se alcanzó nuevamente en 2011; 33.5°C en 2003 y 33°C en 1969.

Conociendo el clima prevaleciente en la ciudad de México y gran parte de su área metropolitana, hablar de condiciones benignas sería lo normal, y de condiciones extremas (frías o cálidas) de algo en realidad inusual. El IPCC, como se comentó anteriormente, considera (estadísticamente) que ocurre un episodio extremo cuando sobrepasa, en una serie de datos, el percentil 90 o bien si se encuentra por debajo del percentil 10. En una distribución normal (de campana de Gauss), estos registros se encuentran en las “colas”, pero si se convierten en un patrón persistente, se pueden clasificar como eventos climáticos extremos (López-Díaz *et al.*, 2014).

Este criterio para identificar extremos de temperatura, muestra, para la ciudad de México en dos zonas distintas (Observatorio de Tacubaya al poniente, Observatorio del Colegio de Geografía al sur) una tendencia ascendente en la presencia de días con temperatura extrema (en el cuarto percentil) en la temperatura máxima registrada en un periodo de 48 años, tomando como base el inicio de registro en el Observatorio del Colegio de Geografía en el año 1963. (Fig. 29).



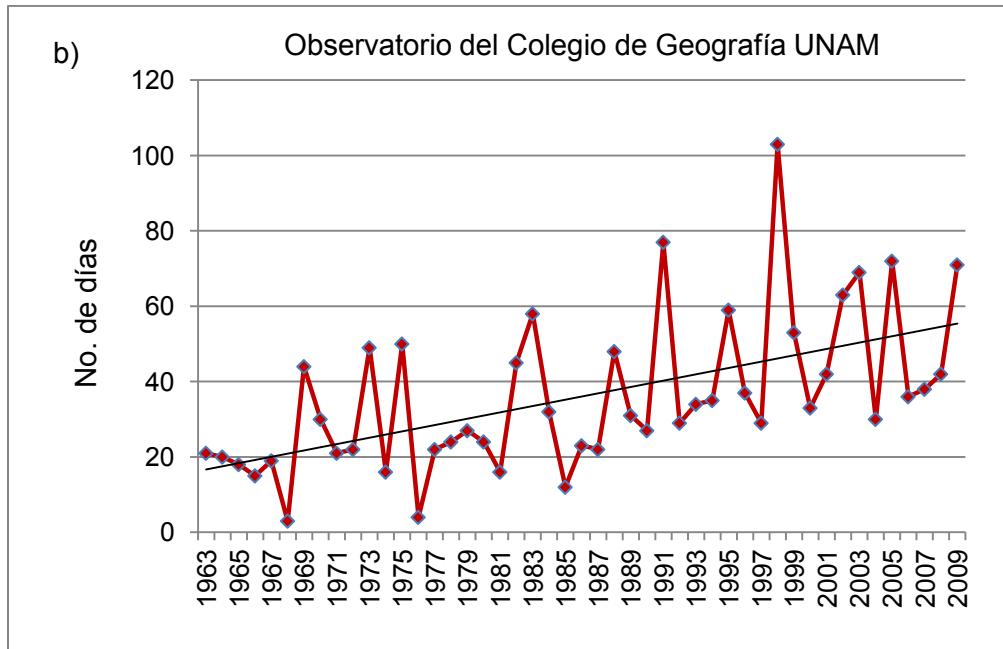
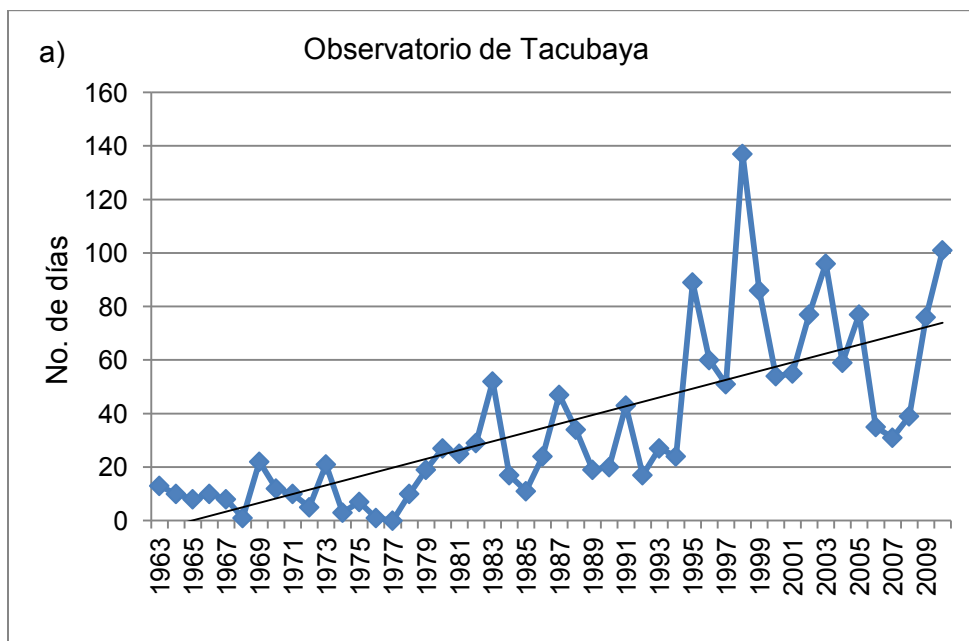


Fig. 29. Número de días en que se superó el percentil 95 en las temperaturas máximas: a) Observatorio de Tacubaya y b) Observatorio del Colegio de Geografía de la UNAM. Periodo 1963-2010.

También de forma ascendente es la tendencia en las temperaturas mínimas que superan el percentil 90, debido a la influencia de la superficie urbana. Los dos sitios en la ciudad muestran una mayor frecuencia en la presencia de temperaturas mínimas que se caracterizan como extremas por ser más cálidas (Fig. 30).



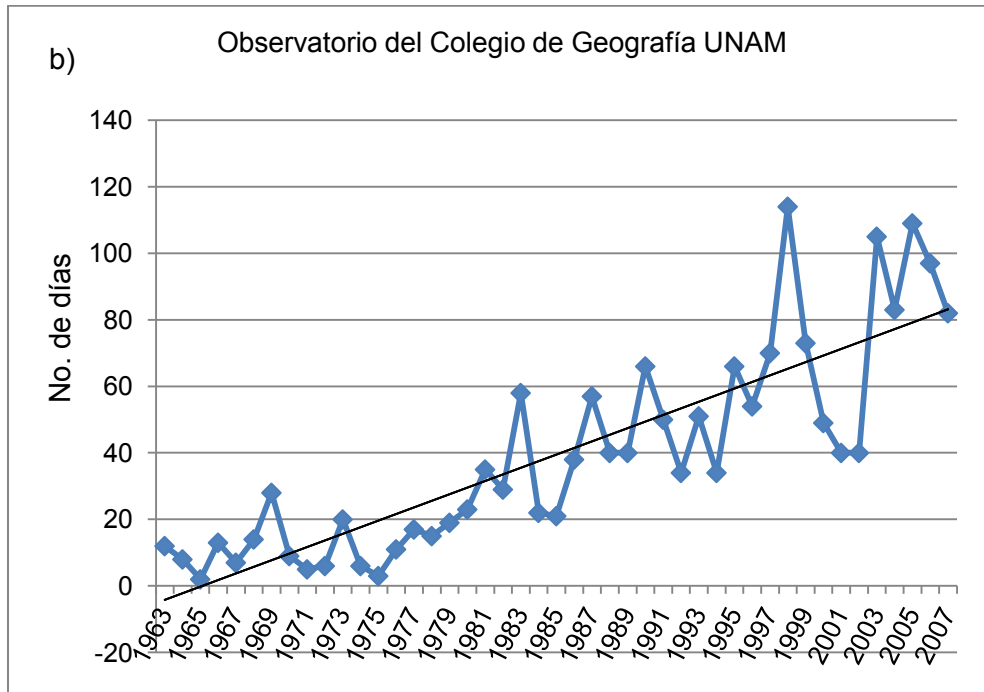
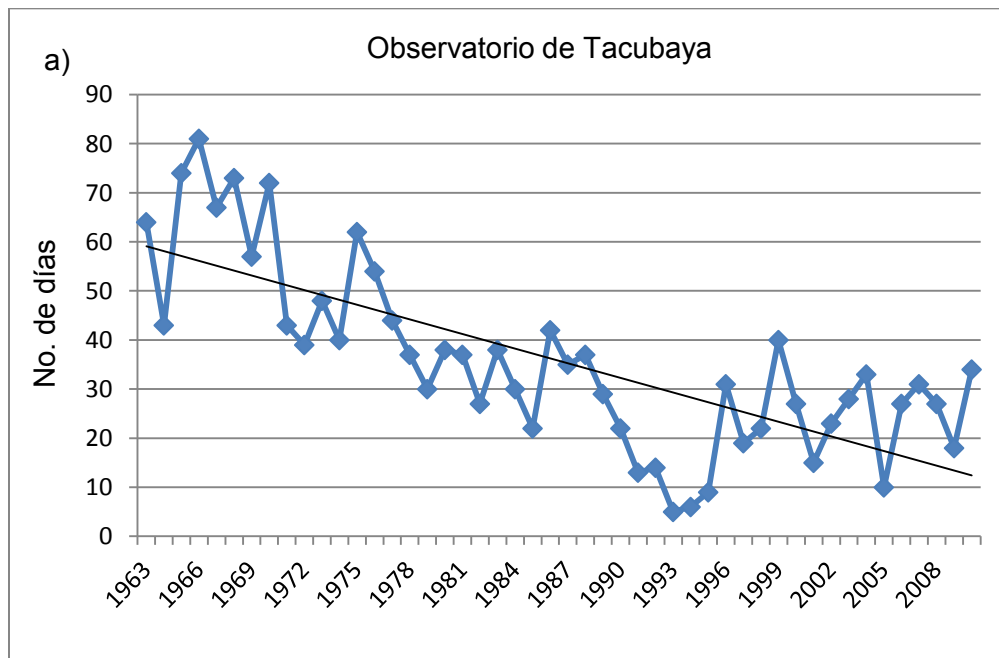


Fig. 30. Número de días en que se superó el percentil 90 en las temperaturas mínimas: a) Observatorio de Tacubaya y b) Observatorio del Colegio de Geografía de la UNAM. Periodo 1963-2010.

De la misma manera, las temperaturas por debajo del percentil 10, temperaturas que se consideran extremas por frío, muestran una tendencia a disminuir su frecuencia. Sin embargo, no dejan de presentarse periodos inusualmente fríos (Fig. 31).



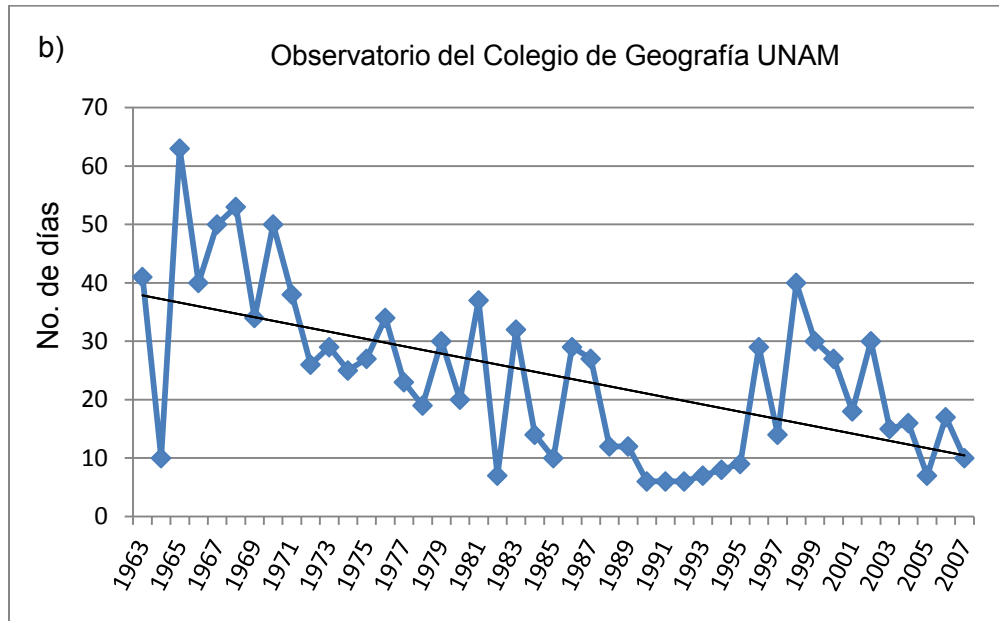


Fig. 31. Número de días por debajo del percentil 10 en las temperaturas mínimas: a) Observatorio de Tacubaya y b) Observatorio del Colegio de Geografía de la UNAM. Periodo 1963-2010.

La tendencia mundial a un ambiente más cálido, por efecto del cambio climático y por el calentamiento urbano a una escala menor, ha incidido en una búsqueda de umbrales y parámetros para ubicar los posibles riesgos a la población.

Jáuregui (2009), ante esta percepción de ciudades en vías de calentamiento, localizó, para la Ciudad de México, las temperaturas mayores a los 30°C registradas en el Observatorio de Tacubaya desde principios del siglo XX. Si bien la ubicación del observatorio no es del todo representativa de la ciudad por su carácter rural en un inicio y posteriormente urbano en el pie de la montaña, es el único registro accesible de largo periodo. El resultado de esta búsqueda dio como resultado la evidencia de una mayor ocurrencia de periodos cálidos consistentes en tres días consecutivos, o más, con temperaturas mayores a los 30°C y una medio igual o superior a los 24°C (Fig. 32):

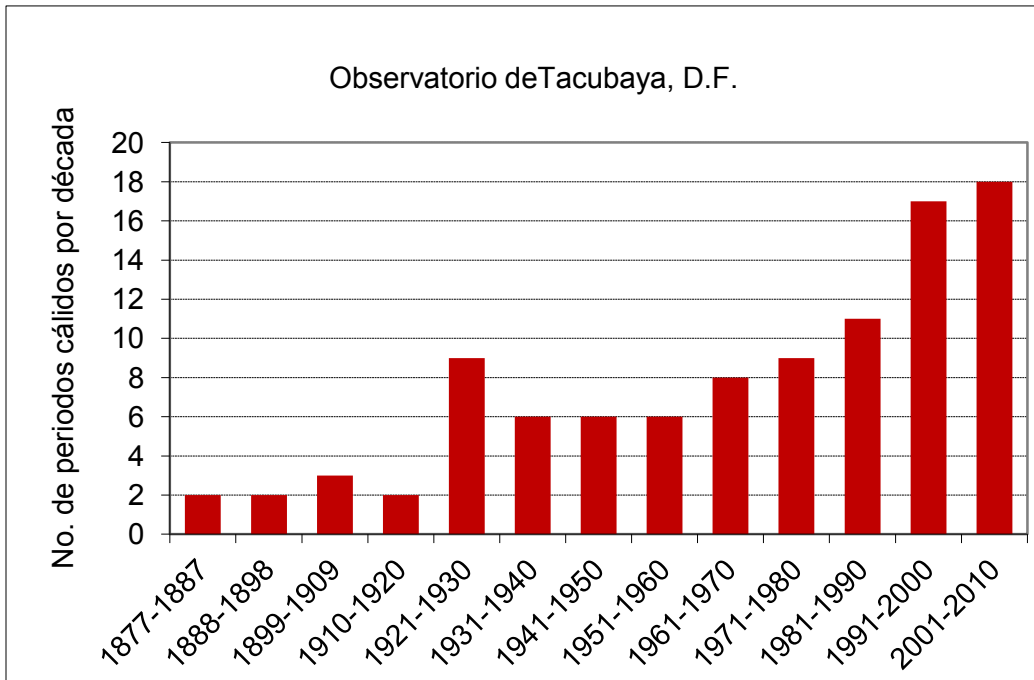


Fig. 32. Periodos cálidos (tres o más días consecutivos > 30°C) en el Observatorio de Tacubaya, 1877-2010. Modificado de Jauregui (2009).

En el Observatorio del Colegio de Geografía, ubicado en Ciudad Universitaria, al sur de la capital, los registros de poco más de cincuenta años, el efecto encontrado es similar (Fig. 33). Por ser de más reciente creación que el Observatorio de Tacubaya, esta figura muestra la presencia de periodos cálidos de forma anual, donde a partir de la década de los noventa estos sucesos climáticos aparecen consistentemente. Hay que aclarar el hecho de que en todos los sitios observados, el año 1998 destaca por la presencia de estos periodos cálidos y su larga duración (incluso mayor a 15 días) debido a los efectos del fenómeno de El Niño. Durante la ocurrencia de este fenómeno, la precipitación en verano suele ser menor o presentarse con retraso, lo cual provoca un aumento en la temperatura. En 1998 fue particularmente intenso.

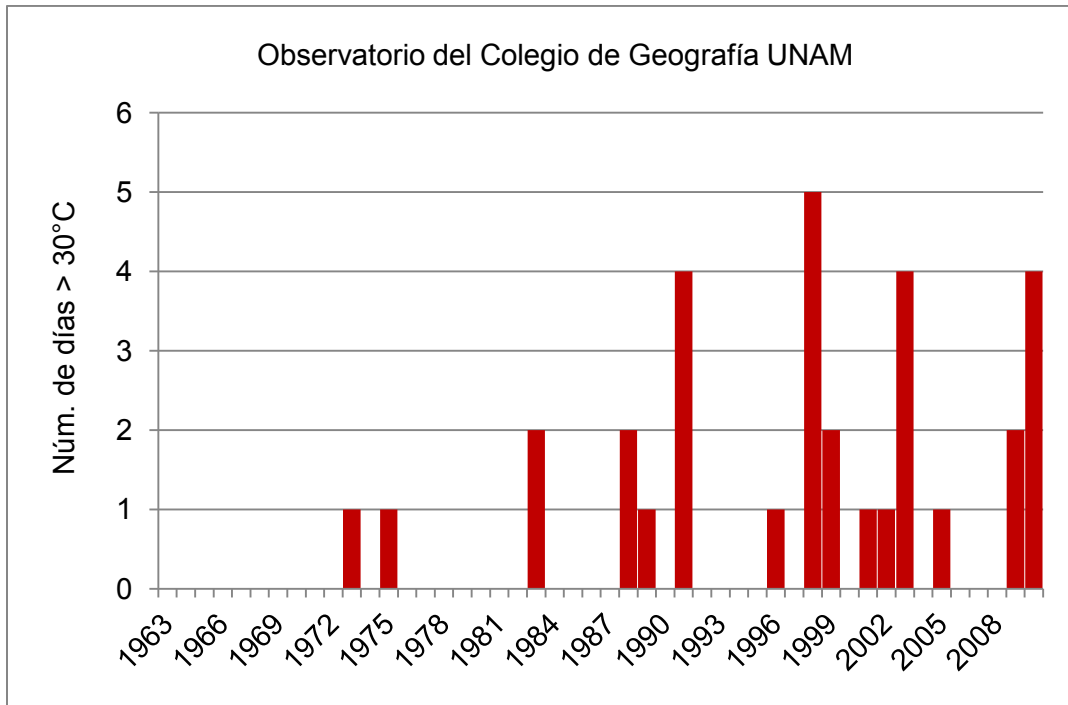


Fig. 33. Días con temperatura máxima mayor a 30°C en el Observatorio del Colegio de Geografía, UNAM. 1963-2009. Fuente: elaboración propia.

Al observar una mayor frecuencia de periodos cálidos surgió la duda de cómo la población percibe, fisiológicamente, la temperatura en esos días, de cómo se traduce en sensaciones térmicas. Jáuregui (2009) utiliza índices bioclimáticos donde involucra, además de la temperatura, a la humedad, nubosidad, punto de rocío etc. como parámetros meteorológicos, y considera también variables como la actividad física y metabolismo, características físicas de los individuos (sexo, altura, indumentaria), y geográficas como latitud, longitud, altitud y fecha del cálculo. Estos índices bioclimáticos utilizados fueron el PET (Physiological Equivalent Temperature) y PMV (Predicted Mean Vote) propuestos por Höpfe (1999) y Fanger (1970) respectivamente. Los resultados muestran que la respuesta fisiológica de la población tuvo un impacto de ligero a moderado, aunque el autor no pierde de vista un incremento en la peligrosidad de estos eventos ante la presencia del cambio climático, que significaría una mayor frecuencia de temperaturas más altas por la noche.

Así es que la sensación generalizada de que las ciudades en la actualidad son cada vez más cálidas, no sólo en las horas de la mañana (temperatura mínima) sino también al medio día, es acertada. La frecuencia con que se han presentado estos periodos cálidos ha sido mayor en las últimas décadas, no sólo en la Ciudad de México, sino en otros sitios con urbanizaciones menos densas, como algunas ciudades importantes de Veracruz.

Díaz-Lázaro (2011) así lo demuestra al analizar este fenómeno en seis ciudades de esa entidad en un periodo de casi 30 años. Además realiza un hallazgo interesante al clasificar estos periodos cálidos por intensidad cuando las altas temperaturas también se presentan en las temperaturas mínimas al superar el percentil 95. Este tipo de periodos cálidos de día y de noche consecutivos (circadianos), son en nuestros días más frecuentes que hace treinta años.

La presencia de días extraordinariamente cálidos necesita de circunstancias atmosféricas especiales, condiciones que se presentan ocasionalmente que en forma combinada desembocan en un aumento inusitado de la temperatura. Esto puede suceder cuando las masas de aire cálido se expanden en un movimiento ondulatorio e invaden otras zonas por periodos realmente cortos, de tres a cuatro días, aunque pueden prolongarse por más tiempo (Aparicio, 2005), del orden de una a dos semanas.

Sin embargo, denominar la presencia de fenómenos inusualmente cálidos específicamente como *olas de calor*, implica condiciones más allá de establecer una temperatura límite a superar en base a una percepción casi psicológica, o meramente estadística. Actualmente los criterios para definir una onda de calor son diversos. No se ha establecido, hasta ahora, ninguno que incluya todas las características necesarias para todos los sitios y sus diferentes poblaciones. En general, una onda de calor significa la presencia de temperaturas más cálidas de lo normal en un cierto periodo. Definir cuánto por arriba de lo normal y durante qué tiempo, es el motivo de múltiples apreciaciones acerca de considerar o no un periodo como onda de calor.

Se han establecido, en varios lugares del mundo, umbrales a partir de cambios drásticos en la salud de la población, es decir, en un aumento en la morbilidad reflejada sobre todo en los ingresos hospitalarios o bien a través del uso de índices que involucran variables como la humedad, el viento, las características fisiológicas humanas, etc. aplicados a respuestas bioclimáticas. Diversos trabajos realizados recientemente en la península ibérica muestran la existencia de una temperatura máxima diaria a partir de la cual se observa un incremento acusado de la mortalidad. Para el caso de Madrid esta temperatura máxima diaria de «disparo de la mortalidad» es de 36,5 °C; 41°C para Sevilla; 33,5 °C para Lisboa (Díaz Jiménez *et al.*, 2002). Todas estas temperaturas coinciden con el percentil 95 de las máximas diarias para el periodo cálido.

Otro método es el de elegir umbrales arbitrarios, temperaturas límite que se ajusten a la reacción de la población y su comportamiento en un área geográfica determinada (Cardós, 2006). En Argentina se considera la presencia de una ola de calor cuando las

temperaturas superan el percentil 90 (Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, <http://www.smn.gov.ar/>).

En España, y con seguridad en casi cualquier lugar del mundo, la presencia en verano de una onda de calor puede causar mayor número de víctimas en vidas humanas que casi cualquier otro suceso climático, produciendo sus efectos más graves en niños y ancianos. En cambio, su presencia en invierno puede llegar a reducir la mortalidad durante esos días (Cardós, 2006). Debido al aumento de temperatura inducido por el cambio climático, cabría esperar que este hecho aumentara tanto en frecuencia como en intensidad, en duración y extensión (Yagüe *et al.*, 2006).

La WMO (World Meteorological Organization) adoptó el término de ola de calor para referirse a la consecución de tres o más días con temperaturas de 32.2 °C o mayores (Jáuregui, 2009), sin considerar condiciones geográficas y aclimatación de la población. Jáuregui (2009), descarta la utilización de este umbral pues en la Ciudad de México difícilmente se alcanza esa temperatura, y mucho menos en una sucesión de tres días.

“El calor mata meteorológicamente, el frío climáticamente” (Miguel Razo Nadal durante el Congreso de Climatología de la Asociación Española de Climatología 2010).

Establecer un criterio para definir una onda de calor puede ser una tarea difícil si se desea ir más allá de un mero límite estadístico, mucho más si no se tiene un umbral que represente un cambio o una modificación en algún parámetro representativo de la población que se vea afectada por la presencia de extremos climáticos.

Dado que en la Ciudad de México el clima termal suele ser suave, aun con extremos antes ocasionales y ahora más frecuentes, hasta el día de hoy no se ha establecido ningún umbral de temperatura que defina un despegue, una afectación directa en la población. El ideal a medir sería un cambio en la morbilidad y mortalidad de los habitantes. El estudio de la temperatura, fuera del ámbito riguroso de la climatología, ha adquirido importancia en otras disciplinas brindándole una gran atención en lo concerniente a la epidemiología (Basu, 2009).

Las personas tienden a aclimatarse a la experiencia más común en un rango de temperatura, un leve desplazamiento de esa zona causa un estrés fisiológico (O'Neill *et al.*, 2005), tanto para frío como para calor. Una diversidad de estudios (Alfesio *et al.*, 2002; Basu, 2009; Bell *et al.*, 2008; Cámara, 2006; Díaz, 2002; Gosling *et al.*, 2007; Kalkstein y Valimont, 1987; McMichael *et al.*, 2008; Meze-Hausken, 2008; O'Neill *et al.*, 2005; Rose, 1966; Velasco, 2014), ha demostrado la sensibilidad fisiológica de los humanos a los

extremos de temperatura en ciudades tanto de latitudes bajas como altas, donde las respuestas se multiplican en una variedad amplia de muestras imposible de generalizar a toda la especie humana. Se han encontrado resultados interesantes, y más que nada útiles, con la finalidad de que los impactos de los extremos de temperatura puedan proveer de información importante en la salud potencial e impactos económicos para estrategias de control, tomando en cuenta que la morbilidad aumenta con extremos de temperatura y que el cambio climático empeorará la situación en ciertas áreas (ONeill *et al.*, 2005). En el caso de México, los hogares típicos carecen de calentadores y aire acondicionado, lo cual limita el adecuado control de la temperatura. Esto afectará aun más a los sectores más desfavorecidos (McMichael *et al.*, 2008).

En la mayoría de los países desarrollados se ha mostrado que los extremos de temperatura vienen marcados por un incremento en la mortalidad, sin embargo la sensibilidad de la mortalidad por frío y por calor ha declinado en décadas recientes, a pesar de ejemplos como el del año 2003 por la ola de calor en Europa (McMichael *et al.*, 2008). El acceso casi generalizado al clima artificial ha logrado el objetivo de paliar los efectos de los climas hostiles, haciendo uso, por supuesto, de los recursos energéticos, medida cuestionable también ante el fenómeno del cambio climático. El uso del clima artificial se convirtió en una medida de adaptación, sin duda, y ha cumplido su cometido.

La mortalidad por temperatura, persistente en países en vías de desarrollo, y paliada en gran parte de los países desarrollados (o bien también manejado como países de latitudes bajas y latitudes medias y altas), ha sido tratada por algunos autores haciendo mención de ciertas características generales, las cuales ha sido necesario explorar para la investigación a realizar para la Ciudad de México:

- En el caso de los países de latitudes medias y altas, el efecto general de las bajas temperaturas predomina sobre las altas. Sin embargo, la forma de las curvas en la relación temperatura y mortalidad indican una marcada elevación ante extremos de calor con respecto al frío (McMichael *et al.*, 2008). En la ciudad de México, como para Monterrey, se muestra una clara y marcada elevación y descenso de la mortalidad en los meses alrededor del invierno, a pesar de que en invierno se presentan en realidad cambios modestos en las temperaturas. Katayama y Momiyama (1970), reportado por Kalkstein (1987) encuentran que sitios con rangos de temperatura poco amplios exhiben pronunciadas regresiones en la correlación mortalidad - temperatura en comparación con sitios de amplios rangos térmicos. De igual manera, ONeill *et al.* (2005) muestra que en la Ciudad de México, respecto a la mortalidad, el efecto del frío es mayor.

- En contraste, no hay un incremento estacional en las tasas de mortalidad en los periodos de más elevadas temperaturas. Haciendo comparaciones de promedios con un desplazamiento de cero hasta dos semanas de promedios móviles (O'Neill *et al.*, 2005), para la Ciudad de México el efecto del frío fue mayor, el efecto del calor fue relativamente insensible a las medias, pero fue mayor con tres días de promedios móviles.
- La susceptibilidad a la muerte por calor se incrementa con la edad, e incluso en la Ciudad de México, estos efectos fueron consistentes en la población mayor a 65 años, y más pronunciadamente en hombres (Bell, *et al.*, 2008). La evidencia que existe indica que un desplazamiento corto de días no cuenta sustancialmente para las muertes relacionadas con calor en los países subdesarrollados (McMichael *et al.*, 2008). Sin embargo, al parecer son limitados los estudios que han evaluado cuáles personas son las más vulnerables a extremos de temperatura en países subdesarrollados (O'Neill *et al.*, 2005) pues el número de variables a considerar implica una recolección de información sanitaria, socioeconómica, cultural, de infraestructura urbana, entre otras cosas, para la caracterización de la vulnerabilidad de la población ante los extremos no sólo de temperatura, sino también de la variabilidad climática en general.

Ahora bien, ante la nueva situación atmosférica de las ciudades en cuanto a la calidad del aire que se respira, se considera que ya no es posible hablar de mortalidad por extremos de temperatura sin asociar el elemento gaseoso y particulado que afecta la salud de la población. Estudios en el mundo incluyen concentraciones de contaminantes particulados pues se han asociado con la mortalidad diaria (McMichael *et al.*, 2008). Algunas de las relaciones que se han establecido en diferentes ciudades del mundo y en México han mostrado lo siguiente:

- Evidencia epidemiológica sugiere que tanto el PM₁₀ (partículas menores a 10 micras) como el O₃ (ozono) pueden ser potenciales factores de confusión, y algunos estudios encuentran que el O₃ puede ser un efecto modificador en los meses cálidos. Sin embargo este efecto modificador es relativamente pequeño, y hay una clara independencia en el efecto de temperatura y contaminación en la mortalidad (Basu, 2009). No existe claridad en algunos estudios de cómo los contaminantes actúan y es necesario separar los efectos independientes respecto a la temperatura pues se influyen uno a otro frecuentemente (Basu, 2009). Según O'Neill *et al.*, (2005) las concentraciones de contaminantes particulados y el O₃ han sido importantes predictores de la mortalidad en estudios previos para México.

- Es posible no incluir al ozono (O₃) en los análisis por su dependencia con la temperatura diurna, por lo que se coloca, al final o en parte, como causa entre temperatura y mortalidad. Para estudios efectuados en la Ciudad de México, la inclusión de O₃ y PM10 (partículas menores a 10 micras) ha dado como resultado un bajo efecto en comparación con la relación de temperatura y mortalidad. Las correlaciones de O₃ y temperatura han resultado en un máximo de 0.46 en la época cálida y de 0.14 el resto del año, relativamente bajas, por lo que quizá el potencial efecto se da en otros sitios (O'Neill *et al.*, 2005). Por ejemplo, la Temperatura Aparente calculada (índice bioclimático propuesto por Steadman, 1979) tiene una correlación positiva con el ozono en la ciudad de Santiago de Chile (0.66), pero no en otras ciudades según Bell *et al.* (2008). Esta misma Temperatura Aparente no co-varía con el PM10 en ninguna ciudad. El mismo autor considera que es necesario estudiar el papel de la contaminación por las asociaciones positivas entre PM10 y el riesgo de mortalidad.

La relación entre mortalidad y temperatura, generalmente se aboca, en los estudios encontrados, a una población a la que consideran sensible, es decir, que posee las características necesarias para ser afectada por los extremos térmicos. Se acota a una población que, en un cúmulo de fragilidades individuales, sufre un impacto ante la exposición al calor o al frío, buscando una asociación positiva en la mortalidad entre los primeros días en comparación con los días subsecuentes en que la asociación mortalidad-temperatura debiera ser negativa (Basu, 2009). De no ser así, el problema concierne ya a la salud pública. Los resultados encontrados aportan las siguientes generalidades:

- Los subgrupos poblacionales que suelen ser más afectados corresponden, en enfermedades respiratorias, a los menores de cuatro años y a los mayores de 65, en enfermedades cardiovasculares a los mayores de 65, estudiados de forma independiente en trabajos como los de O'Neill *et al.*, 2008; Basu, 2009; Bell *et al.*, 2008; Mc Michael *et al.*, 2008; Alfesio *et al.* 2002.
- Cuando la temperatura del cuerpo se eleva, la sangre fluye generalmente de los órganos vitales hacia la parte subyacente de la superficie de la piel en un intento de bajar la temperatura. La habilidad del cuerpo para regular su temperatura (termorregulación) se ve impedida cuando mucha sangre es desviada, incrementando el estrés en el corazón y los pulmones. El incremento en la viscosidad de la sangre, elevados niveles de colesterol asociados con altas temperaturas y elevada sudoración elevan la mortalidad relacionada con calor. (Basu, 2009).

- Específicamente, todos aquellos que mueren por enfermedades cardiovasculares, respiratorias y otras enfermedades específicas cardiovasculares como enfermedad isquémica de corazón, falla congestiva cardiaca, infarto al miocardio están en mayor riesgo por mortalidad por altas temperaturas (Basu, 2009).
- Las infecciones respiratorias tienen una dinámica mostrando máximos estacionales que inician a mediados del otoño y finalizan con el término del invierno. Las bajas temperaturas ocasionan que el cuerpo sea más propenso a ciertas patologías. El respirar aire frío conlleva una broncoconstricción que facilita la susceptibilidad a los agentes infecciosos (Cámara, 2006). La temperatura ejerce una incidencia inversamente proporcional respecto al número de casos, cuando la temperatura aumenta los casos disminuyen y viceversa. (Velasco, 2014). Es posible que las enfermedades respiratorias incrementen la enfermedad del paciente con males cardiacos conduciéndolo incluso a la muerte (Rose, 1966).
- En general, el efecto de las bajas temperaturas persiste por días, cuando el efecto de altas temperaturas se restringe al día de la muerte o al día siguiente. Para infarto al miocardio, el efecto de días cálidos es el doble que el efecto del día frío. El efecto de días cálidos incluyen un adelanto de muertes porque se observa un déficit los días posteriores, lo que no se observa en el efecto del día-frío. No se observa un claro patrón del efecto de la humedad (Alfesio *et al.*, 2002) Es sabido que la incidencia de enfermedades isquémicas del corazón tienden a elevarse más en invierno que en verano (Rose, 1966).
- Existe una relación de muerte por enfermedades cardiovasculares con frío en México, y de frío con enfermedades respiratorias (McMichael *et al.*, 2008). En la Ciudad de México la causa de mortalidad por enfermedades cardiovasculares está fuertemente asociada con bajas temperaturas en personas mayores, con un 18.8% de exceso (95% CI: 9%-14%). En contraste, la mortalidad por causas respiratorias con bajas temperaturas fue mayor cuando se tomaron a adultos entre los 15 y 65 años. Incluso hay una asociación mayor en la mortalidad por frío con siete días y no la hay para altas temperaturas en la Ciudad de México. La contaminación no fue un factor importante en lo relacionado a efectos por frío en ninguno de los grupos de edad. Analizando dos ciudades mexicanas, hay picos de mortalidad en invierno mucho más grandes en la Ciudad de México que en Monterrey, (O'Neill *et al.*, 2005). Según McMichael *et al.* (2008) es notorio el incremento de mortalidad por cada grado centígrado que la temperatura desciende en la Ciudad de México.

Evidencias de modificaciones en la mortalidad en personas con enfermedades cardiovasculares y respiratorias han mostrado la importancia de la temperatura y sus extremos incluso para la Ciudad de México. La metodología usada ha sido variada, los intervalos de temperatura utilizados corresponden generalmente a temperaturas medias mensuales o bien estableciendo un umbral estadístico a partir del uso del percentil 95 para las temperaturas máximas y el 5 para las mínimas, como lo ha establecido el IPCC.

La morbilidad y mortalidad en la Ciudad de México se modifica con el aumento o disminución de la temperatura (Bell *et al.*, 2008; O'Neill *et al.*, 2005; McMichael *et al.*, 2008; Velasco, 2014), pero ¿cómo saber, entonces, a partir de cuál temperatura, tanto máxima como mínima, la población sensible está en riesgo?

A partir de esta pregunta que, al parecer no ha sido contestada con anterioridad, es que se realizaron algunos análisis estadísticos con datos de mortalidad proporcionados por el Instituto Nacional de Salud Pública y con información climatológica del Observatorio Nacional, ubicado en Tacubaya, para encontrar algún umbral de temperatura a partir del cual se explique la modificación en la mortalidad por las enfermedades más sensibles a los cambios de temperatura, que, según la literatura, corresponden a las del sistema circulatorio y a las del respiratorio.

El análisis se llevó a cabo para cuatro años con características climáticas particulares, donde las condiciones de temperatura y precipitación pueden ser extremas o bien de normalidad, como se observa a continuación:

1998 y 2005, años de El Niño

El fenómeno ENOS (El Niño Oscilación del Sur) que es un patrón oceánico-atmosférico de variabilidad natural (CNA,) provoca, en México, una disminución en las lluvias de verano en la mayor parte del país (Magaña, 1999). Se presenta de manera irregular en ciclos cada 2 a 7 años. La disminución en la precipitación llega a producir sequías e incendios por la menor humedad del suelo. La menor cantidad de nubes permite el aumento en la cantidad de radiación que llega a la superficie por lo que se registran mayores temperaturas (Magaña *et al.*, 1999). Los años 1997-98 fueron protagonistas de un El Niño que ocasionó severos desastres por la falta de precipitación y los incendios que se generaron. Se considera el evento de mayor intensidad, incluso que el de los años 1982-1983 que ya se consideraba el “evento del siglo” (Glantz, 1998, en Magaña *et al.*, 1999).

Un El Niño débil, como en el año 2005, significa que para el centro del país la precipitación se comportará con normalidad tanto en primavera como en verano, incluso con mayor humedad en este último y en otoño e invierno (Magaña *et al.*, 1999).

2000 y 2008, años de La Niña

Corresponde a la parte fría del fenómeno ENOS, donde los veranos en la mayor parte de México son cercanos a la normalidad aunque pueden presentarse precipitaciones intensas. Al haber una disminución de humedad en la región del altiplano, es posible que se presente un enfriamiento radiativo y las consecuentes heladas sobre el centro del país (Magaña *et al.*, 1998) debido a una retracción de hacia el norte de la Alta del Atlántico Norte y vientos alisios débiles (Peralta, 2001). En general, en años de La Niña las lluvias son normales o mayores y parecería que son opuestas a las condiciones de El Niño, aunque no es estrictamente así. En el registro de años de La Niña, el año 2000 fue considerado como intenso, mientras que el 2008 como débil.

Para llevar a cabo el análisis estadístico, se contó con información diaria de temperatura máxima, temperatura mínima, mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio y respiratorio de los años anteriormente seleccionados. Cada uno fue tratado por separado para hallar los umbrales de temperatura correspondientes a una situación climática de escala regional.

Las características de los datos y de la metodología fueron los siguientes:

Los datos

De la base de datos de mortalidad (asentada caso por caso), proporcionada por el Instituto Nacional de Salud Pública, se extrajo la información referente a los años antes mencionados para las enfermedades del sistema circulatorio y respiratorio, de la Clasificación Internacional de Enfermedades, 10ª Revisión. La Clasificación Estadística Internacional de Enfermedades y Problemas Relacionados con la Salud, Décima Revisión (CIE-10) fue respaldada por la Cuadragésima Tercera Asamblea Mundial de la Salud en mayo de 1990 y se empezó a usar en los Estados Miembros de la Organización Mundial de la Salud (OMS) a partir de 1994. La CIE-10 constituye uno de los estándares internacionales más usados para elaborar estadísticas de morbilidad y mortalidad en el mundo (WHO).

Las enfermedades consideradas para este estudio pertenecen a la clasificación **I00 a I99** que corresponden a las del sistema circulatorio como serían, por ejemplo, las

enfermedades cardíacas reumáticas crónicas, las hipertensivas, las isquémicas del corazón, las cardiopulmonares y las enfermedades de la circulación pulmonar.

En cuanto a las del sistema respiratorio, que abarcan de **J00** a **J99** en la clasificación, las enfermedades corresponden, por ejemplo, a infecciones agudas de las vías respiratorias superiores, influenza, neumonía, infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores, entre otras (http://www.sssalud.gov.ar/hospitales/archivos/cie_10_revi.pdf).

En cuanto a la base de datos climatológica del Observatorio de Tacubaya del Servicio Meteorológico Nacional, se obtuvieron los datos de temperatura máxima y temperatura mínima diaria correspondientes a los años antes mencionados con características climáticas particulares.

Aunque en algunas publicaciones de la literatura consultada (O'Neill *et al.*, 2005; Basu, 2009; Bell *et al.*, 2008) se habla de una no clara influencia de los niveles de contaminación (por PM10 y O₃), se realizó un análisis preliminar de correlación de niveles de estos contaminantes con mortalidad, por lo que se obtuvieron los datos del año 1998 para la estación que mostrara los niveles más elevados, los cuales correspondieron a la zona suroeste para ozono y del centro de la ciudad para PM10. Esta información se obtuvo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), un sitio del Portal Ciudadano del Gobierno del Distrito Federal, perteneciente a la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA).

A partir de la obtención de los datos, se procedió a llevar a cabo la siguiente metodología para la obtención de un umbral de temperatura que marcara diferencias en la mortalidad, por las enfermedades antes mencionadas, en el grupo de población correspondiente a mayores de 65 años:

Metodología

Con la información diaria de temperatura máxima o de temperatura mínima separada por cada grado °C, se asoció la mortalidad correspondiente al día de ocurrencia, por lo que se tiene un determinado número de fallecimientos para cada grado de temperatura, una mortalidad a cada temperatura máxima y mínima diaria. A partir de la asignación correspondiente, se obtuvo la media de mortalidad para cada grado. Lo mismo se realizó para la mortalidad desplazada para uno, dos y tres días de ocurrida la temperatura, tomando en cuenta que la reacción de las personas sensibles a la presencia de cierta temperatura pueda manifestarse varios días después, en este caso, hasta tres.

El análisis se llevó a cabo con los datos de forma anual, sin una división estacional, ni tampoco se tomó en cuenta una secuencia meteorológica, por lo que sólo se medirá el impacto de cada temperatura en el número de muertes, haya ocurrido indistintamente en cualquier época del año. El análisis se realizó por separado para mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio y otro para enfermedades del sistema respiratorio.

Una vez obtenidas las medias de mortalidad por cada grado de temperatura, se hace el planteamiento de si esas diferencias son significativas. La razón principal para utilizar el análisis de varianza (prueba de Fisher, F) es la existencia de más de dos grupos (temperaturas) en el planteamiento. Se comparó, entonces, la media de todos los grupos. Los grupos son de distinto tamaño, pues a cada temperatura (máxima o mínima) le corresponde la mortalidad del día en que se presentó, las temperaturas más frecuentes forman un grupo más grande.

$$F = \frac{\text{diferencias o variabilidad entre las medias}}{\text{diferencias o diversidad de los sujetos dentro de sus grupos}} = \frac{\text{CM entre grupos}}{\text{CM dentro de los grupos}} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde CM significa los cuadrados medios:

$$\text{CM} = \frac{\sum n\sigma^2}{g.l.} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde g.l. significa grados de libertad.

Un valor de F significativo nos dice si hay diferencias entre las medias de los diferentes grupos, pero no nos dice en qué grupos está la diferencia. Para identificar las temperaturas que marcan una diferencia en mortalidad existen diferentes procedimientos, uno de ellos es el (contraste) de Scheffé, siendo uno de los contrastes más utilizados en el que se pueden comparar las medias de dos en dos o en combinación. Además las muestras pueden ser de tamaño idéntico o diferente, con lo que se justifica la utilización de este contraste en las medias de mortalidad.

$$| M_1 - M_2 | = t' \sqrt{\text{CMdentro} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$t' = \sqrt{(k - 1)F} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde k significa el número de grupos y F los valores que vienen en las tablas de distribución de Fisher (<http://www.mat.uda.cl/hsalinas/cursos/2011/2do/tabla-fisher.pdf>).

El contraste de Scheffé es un procedimiento muy conservador especialmente útil cuando se exploran las diferencias entre grupos (mortalidad por temperatura): si no se acepta la hipótesis nula (y se afirma que sí hay diferencias entre las medias de mortalidad por temperatura), la posibilidad de equivocación es mínima (Morales, 2008).

Una vez identificados los grupos de temperatura con medias de mortalidad diferentes, se puede vislumbrar un *umbral* que marca un cambio en la mortalidad por efecto de la temperatura. Para tratar de confirmar ese umbral se realizó un contraste de medias (utilizando el error típico de las diferencias z), reagrupando los datos en dos muestras, tomando como base el valor umbral encontrado.

$$z = \frac{\left[\frac{\text{la diferencia entre las dos medias}}{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|} \right] - \left[\frac{\text{la diferencia media cuando no hay más diferencias}}{\text{que la aleatorias} = \text{cero}} \right]}{\text{Desviación típica de la distribución de las diferencias aleatorias o } \textit{casuales} \text{ entre medias}} \\ \text{(o error típico de las diferencias entre medias cuando las muestras proceden de la misma población)}$$

(Ec.5)

convencionalmente:

$$z = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2| - 0}{\sigma_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}} \quad \text{(Ec. 6)}$$

Mediante el análisis de varianza y el contraste de Scheffé, se verifica si las diferencias de las medias del número de muertes por día son estadísticamente significativas con respecto a una temperatura. Con esto se pretende decir si las diferencias encontradas entre las medias del número de muertos en función de la temperatura son mayores a las que podrían encontrarse por azar (que no están dentro de la variabilidad normal). En tal caso, se podrían atribuir las diferencias al efecto de la temperatura en la mortalidad.

Ahora bien, esta diferencia significativa podría no coincidir con una relevancia práctica del resultado encontrado. Para juzgar la relevancia práctica se calcula el tamaño del efecto de manera análoga a lo que se hace en el contraste de dos medias mediante la prueba de Cohen.

$$\text{Cohen: } \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma} \quad \text{(Ec. 7)}$$

donde

$$\sigma = \sqrt{\frac{(N_1\sigma_{n(1)}^2)+(N_2\sigma_{n(2)}^2)}{N_1+N_2}} \quad (\text{Ec. 8})$$

El tamaño del efecto es una diferencia tipificada: una diferencia entre dos medias dividida por una desviación típica, lo cual indica a cuántas desviaciones típicas equivale la diferencia entre dos medias. Para considerar el valor del *tamaño del efecto*, se suelen aceptar las orientaciones dadas por Cohen (tomado de Morales, 2008):

d= 0.2 (pequeño)

d= 0.5 (moderado)

d= 0.8 (grande)

Con los resultados del contraste de Scheffé y el tamaño del efecto (Cohen), se establece la existencia de un umbral de temperatura **donde hay una diferencia significativa en la mortalidad**.

Resultados

Enfermedades del sistema circulatorio y temperatura

Temperatura mínima:





Los resultados obtenidos muestran, para las enfermedades del sistema circulatorio, un comportamiento acorde con lo hallado en la literatura, donde la mortalidad por temperatura está mayormente asociada con la ocurrencia de temperaturas bajas, aun en las temperaturas máximas, lo cual podría ser indicativo de un periodo frío o cuando menos de un día con temperaturas mínimas bajas y temperaturas máximas también. En este estudio no se llevó a cabo una secuencia meteorológica, un seguimiento del comportamiento sinóptico, por lo que no es posible asegurar esta consecución de días con altas o bajas temperaturas. Sin embargo, los resultados muestran una modificación en la mortalidad a partir de cierta temperatura mínima, como se muestra en el Cuadro 9:

Cuadro 9. Tabla de temperatura mínima umbral para mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio en personas mayores a 65 años. La temperatura como factor de mortalidad diaria (confiable al 95%).

Días de rezago en la mortalidad		0			1			2			3		
Año		v. Cohen	umbral °C **	%mort	v. Cohen	umbral °C **	%mort	v. Cohen	umbral °C **	%mort	v. Cohen	umbral °C **	%mort
1998	ENSO intenso	1.37	8	30	1.44	9	31	1.29	9	32	1.35	8	19
2000	La Niña intenso	1.26	10	28	1.24	10	28	1.23	10	27	1.29	10	28
2005	ENSO débil	0.76	9	15	0.81	8	16	0.95	7	19	0.87	8	17
2008	La Niña débil	1.06	8	20	0.98	8	19	0.96	9	19	0.99	8	19

Diferencia de Cohen entre medias de mortalidad:

0.2	Pequeño
0.5	Moderado
0.8	Grande

-  La temp. **NO** parece ser un factor de mortalidad (Fisher)
-  Scheffé umbral donde comienzan las diferencias entre medias de temperatura
-  Incremento de mortalidad hacia temperaturas más bajas
-  Incremento de mortalidad hacia temperaturas más altas

Como se puede observar en la Cuadro 9, en casi todos los casos el umbral de temperatura que marca la diferencia entre medias de mortalidad es significativo, con el contraste de Scheffé el valor umbral obtenido marca las diferencias entre las medias de los dos grupos obtenidos, superando en casi todos los casos el valor de 0.8, considerado como “grande” según el valor de Cohen. Esta condición prevalece en los cuatro años seleccionados para la mortalidad el día de ocurrencia de la temperatura, y en los tres días de desplazamiento después.

La conclusión parece indicar que la mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio aumenta hacia temperaturas más bajas con umbrales ubicados entre los 7 y los 10°C, con una frecuencia mayor del umbral en los 8°C. La diferencia de mortalidad entre las medias de ambos grupos a partir del umbral establecido varía entre el 15% y 32% en los cuatro años considerados, siendo el año 1998 (ENSO intenso) el de mayor porcentaje, y el año 2005 (ENSO débil) el de menor. Hay que hacer notar que en números absolutos estas diferencias significan, al hablar de un 15% en el año 2005, de 5 personas fallecidas (mayores de 65) más que en las temperaturas del otro lado del umbral.

Temperatura máxima:

Las expectativas respecto a la ocurrencia de temperaturas máximas y el no aumento de mortalidad en personas afectadas por alguna enfermedad del sistema circulatorio se cumplieron en gran medida con lo hallado en la literatura. Al menos en la Ciudad de México, donde las temperaturas máximas no rebasan los 33°C (Observatorio de





Tacubaya), las medias de mortalidad por calor no marcan una diferencia significativa entre los grupos de temperatura. Los resultados se observan en el Cuadro 10:

Cuadro 10. Tabla de temperatura máxima umbral para mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio en personas mayores a 65 años. La temperatura como factor de mortalidad diaria (confiable al 95%).

Días de rezago en la mortalidad		0			1			2			3		
Año		v. Cohen	umbral °C **	%mort	v. Cohen	umbral °C **	%mort	v. Cohen	umbral °C **	%mort	v. Cohen	umbral °C **	%mort
1998	ENSO intenso	0.81	21	↓	19	0.73	19	↓	17	0.86	19	↓	20
2000	La Niña intenso	0.45	21	↓	9	0.51	21	↓	12	0.54	20	↓	9
2005	ENSO débil	0.45	20	↓	7	0.33	20	↓	5	0.67	19	↓	5
2008	La Niña débil					0.44	20	↓	9	0.48	19	↓	10

Diferencia de Cohen entre medias de mortalidad:

0.2	Pequeño
0.5	Moderado
0.8	Grande

-  La temp. **NO** parece ser un factor de mortalidad (Fisher)
-  Scheffé umbral donde comienzan las diferencias entre medias de temperatura
-  Incremento de mortalidad hacia temperaturas más bajas
-  Incremento de mortalidad hacia temperaturas más altas

Las diferencias entre las medias de mortalidad por temperatura en enfermos del sistema circulatorio tiende, a pesar de la poca significancia, a un incremento hacia temperaturas más bajas, lo cual sólo podría explicarse si fuesen una consecución de temperaturas mínimas también bajas que completaran un periodo frío. En los casos analizados, para el día de ocurrencia de la temperatura, sólo en el año 1998 podría ser un factor de mortalidad aunque no significativo dado que no se cumple el umbral que establece el contraste de Scheffé, en el resto de los casos la temperatura no parece ser un factor de mortalidad. En los casos de uno, dos o tres días de desplazamiento en la mortalidad, tampoco hay significancia aunque superan el valor teórico de Fisher, pero sin que las medias sean lo suficientemente diferentes. Aun con el análisis en marcha, los grupos tenderían a una separación entre los 19 y 21°C, un umbral correspondiente a días más bien frescos.

No hay, en los casos analizados, ninguna evidencia de modificación en las medias para temperaturas máximas extremas, como sería la correspondiente al percentil 95 que para Tacubaya es de 29.1°C en los últimos 48 años. Como conclusión a los datos observados, no parece existir evidencia de un significativo aumento en la mortalidad por enfermedades

del sistema circulatorio respecto a temperatura máxima, ni siquiera en las máximas extremas, lo cual es concordante con parte de la literatura consultada.

Enfermedades del sistema respiratorio y temperatura

Temperatura mínima:

Asociar bajas temperaturas con enfermedades respiratorias no es ninguna novedad pues representan, cuando menos a nivel nacional, la principal causa de morbilidad (periodo 1995-2012) (Velasco, 2014). En los primeros años de vida (0 a 4 años), las infecciones respiratorias agudas son comunes y disminuyen entre los 20 y 24 años de edad, presentándose un pico considerable entre los 50 a 59 años y 65 o más, sobre todo en la población masculina (Velasco, 2014).





Los resultados muestran una correspondencia con lo encontrado en la literatura, en los años analizados la mortalidad por grupos de temperatura es significativa en todos los casos, donde existe un contraste de Scheffé y las diferencias entre las medias son grandes (según el valor de Cohen). Las temperaturas umbral halladas son entre los 8 y los 10°C, siendo los 9°C la temperatura umbral más frecuente. Las diferencias entre medias de mortalidad se observan desde el día de ocurrencia de la temperatura y los tres días siguientes de desplazamiento en la mortalidad, donde el año 1998 (ENSO intenso) es el de mayor porcentaje de fallecidos (29 a 31%) con respecto a la media del otro lado del umbral. La mortalidad, como era de esperar, se incrementa ante la presencia de temperaturas más bajas (ver Cuadro 11):

Cuadro 11. Tabla de temperatura mínima umbral para mortalidad por enfermedades del sistema respiratorio en personas mayores a 65 años. La temperatura como factor de mortalidad diaria (confiable al 95%).

Año	Días de rezago en la mortalidad	0			1			2			3						
		v. Cohen	umbral °C	%mort	v. Cohen	umbral °C	%mort	v. Cohen	umbral °C	%mort	v. Cohen	umbral °C	%mort				
1998	ENSO intenso	1.57	9	↓	29	1.68	9	↓	31	1.58	9	↓	29	1.68	8	↓	30
2000	La Niña intenso	1.49	10	↓	23	1.51	10	↓	24	1.52	10	↓	24	1.65	10	↓	25
2005	ENSO débil	1.21	9	↓	17	1.36	9	↓	18	1.39	9	↓	19	1.26	10	↓	17
2008	La Niña débil	1.2	8	↓	15	1.17	8	↓	15	1.12	9	↓	15	1.06	9	↓	14

Diferencia de 0.2 Pequeño
Cohen entre 0.5 Moderado

medias de **0.8** Grande
mortalidad:

-  La temp. **NO** parece ser un factor de mortalidad (Fisher)
-  Scheffé umbral donde comienzan las diferencias entre medias de temperatura
-  Incremento de mortalidad hacia temperaturas más bajas
-  Incremento de mortalidad hacia temperaturas más altas




Temperatura máxima:





Las enfermedades del sistema respiratorio se encuentran asociadas claramente a la ocurrencia de temperaturas bajas, pero no así a temperaturas más elevadas. El análisis de los datos no conduce al hallazgo de un valor en las máximas que se corresponda con un cambio en las medias de mortalidad, como se observa en la Cuadro 12, donde se encuentran umbrales que marcan algunas diferencias pero que no son significativas (salvo dos honorosos casos con temperaturas de 18 y 20°C).

Cuadro 12. Tabla de temperatura máxima umbral para mortalidad por enfermedades del sistema respiratorio en personas mayores a 65 años. La temperatura como factor de mortalidad diaria (confiable al 95%).

Año	Días de rezago en la mortalidad	0			1			2			3						
		v. Cohen	umbral °C	%mort	v. Cohen	umbral °C	%mort	v. Cohen	umbral °C	%mort	v. Cohen	umbral °C	%mort				
1998	ENSO intenso	0.85	21	↓	17	0.72	20	↓	15	0.7	19	↓	14	0.81	22	↓	16
2000	La Niña intenso	0.71	21	↓	9	0.81	21	↓	14	0.81	21	↓	14	1.04	20	↓	18
2005	ENSO débil	0.61	21	↓	13	1.18	18	↓	17	0.99	19	↓	14	0.93	19	↓	10
2008	La Niña débil					0.59	30	↑	8	0.64	19	↓	9	0.32	19	↓	4

Diferencia de Cohen entre medias de mortalidad:

-  0.2 Pequeño
-  0.5 Moderado
-  0.8 Grande

-  La temp. **NO** parece ser un factor de mortalidad (Fisher)
-  Scheffé umbral donde comienzan las diferencias entre medias de temperatura
-  Incremento de mortalidad hacia temperaturas más bajas
-  Incremento de mortalidad hacia temperaturas más altas

Se presenta, sin embargo, un solo caso donde el umbral se establece (aunque con una diferencia en las medias calificada como moderada según Cohen y sin cumplir con el contraste de Scheffé) en los 30°C, ahí la mortalidad aumenta hacia temperaturas más

altas pero sólo con una diferencia del 8%, con un día de desplazamiento durante el año 2008 (La Niña débil). En general, las diferencias no significativas entre medias corresponden a temperaturas máximas bajas, entre los 18 y 22°C, con lo que en realidad habría de reconocer la ocurrencia de temperaturas mínimas extremas que completen con las máximas una secuencia de días fríos promotores de un aumento en la mortalidad por enfermedades respiratorias en población suficientemente sensible.

Si bien se habla de que no es posible en la actualidad analizar la ocurrencia de muertes por temperaturas extremas sin considerar las condiciones en la calidad atmosférica, el análisis realizado para datos diarios de PM₁₀ y O₃ en el año 1998, no mostraron correlaciones (o bajas) de niveles de estos contaminantes con la mortalidad en el día de ocurrencia de cada temperatura y los tres posteriores respecto a la mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio y respiratorio. Dados los resultados, se consideró, al menos por el momento, no recurrir al análisis de los años restantes utilizados para el establecimiento de los umbrales de temperatura. Además, independientemente de la influencia que pudiera ejercer la contaminación o la relación que pudiese existir con la situación meteorológica misma (pues los niveles de contaminación guarden una relación directa con el comportamiento de la atmósfera), el hecho de establecer un umbral no podría condicionarse a la calidad del aire como una variable más, al menos por ahora.

Se puede concluir, por tanto, que la noción que se podía tener de asociar una mayor mortalidad a episodios extremos por altas temperaturas en la Ciudad de México es todavía una noción no comprobable para las enfermedades tratadas en el grupo de edad seleccionado. Tomando en cuenta la literatura también, los episodios de bajas temperaturas ejercen una mayor presión en la salud de las personas sensibles y puede convertirse en un factor importante en el empeoramiento de la situación de algunos de ellos. El análisis de los datos obtenidos así lo demuestra, si bien no habría que dejar de lado el papel de la contaminación atmosférica ni tampoco el análisis de datos de otros grupos de edad y otras enfermedades que pudiesen estar vinculadas con las condiciones meteorológicas extremas.

Estos resultados también conducen a la reflexión de si estas enfermedades sensibles a las bajas temperaturas tenderán a responder con una disminución en la mortalidad a causa del aumento de las temperaturas ocasionadas por el calentamiento urbano o bien por el cambio climático, si acaso la población pudiera beneficiarse de estos dos efectos combinados. Posiblemente en un futuro los umbrales tenderán a recorrerse en el sentido de un aumento de la mortalidad por altas temperaturas, aunque quizá ocurran en otro tipo de enfermedades y abarquen a rangos de edad por ahora menos susceptibles.

El conocimiento de un umbral donde se dispare la mortalidad por cierto tipo de enfermedades es sólo el comienzo de una investigación más amplia y profunda en el establecimiento de un criterio para declarar la existencia de una ola de calor o de frío. El análisis presentado en este capítulo puede ser un inicio viable para estudios posteriores relacionados con la salud de la población, ubicando personas vulnerables y condiciones climáticas.

Este conocimiento será necesario para un manejo futuro en condiciones de cambio climático, con vistas a una adaptación y el desarrollo de programas para lograrla. Por este motivo, es conveniente conocer y estimar las condiciones térmicas a futuro en la aproximación que puedan proporcionar los modelos de circulación general seleccionados para nuestro país. Si bien no es posible todavía conocer cuáles serán los umbrales que definan situaciones de peligro por temperatura, se puede estimar la sensación térmica que experimentarán los habitantes de la ciudad.

Estas proyecciones, en escenarios futuros cercano y lejano, serán útiles no sólo para cuestiones de confortabilidad y posteriores hallazgos sanitarios, sino que pueden ser empleados para dos de las principales preocupaciones en cambio climático: el consumo de energía y el consumo de agua.

5. Bioclima para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Las ciudades, por su localización geográfica, están sujetas a los efectos del clima, y a su vez tienen la capacidad de modificarlo. A la condición inicial, habiendo agregado el efecto urbano posteriormente, es necesario añadir el ocasionado por el cambio climático global. En un futuro cercano (2015-2039) y uno lejano (2075-2099), los modelos de circulación estiman un aumento en la temperatura de la ZMCM que conducirán a condiciones de mayor estrés térmico. El objetivo de este capítulo es el de aplicar un índice bioclimático que estime la sensación térmica en un escenario base y los escenarios futuros cercano y lejano. Esta evaluación se muestra a través de bioclimogramas para una mejor apreciación de los resultados horarios durante los doce meses del año.

5.1 Escenarios climáticos para los horizontes 2015-2039 y 2075-2099.

Las ciudades han modificado sus propias condiciones térmicas a un ritmo más acelerado que el del cambio climático global. Desde hace algunas décadas, la atribución urbana ha tenido un impacto aún mayor que el avance de las condiciones de cambio climático a nivel planetario (Dirmeyer *et. al*, 2010).

El crecimiento urbano sostenido y, sobre todo, un crecimiento con escasa planeación, tenderá a intensificar las diferencias térmicas respecto a las de la naturaleza original del sitio, independientemente de la existencia de un cambio global del clima. La población del mundo, con una tendencia cada vez más urbana, está atendida a estos cambios locales y globales, razón por la cual es necesario estimar a futuro, con intenciones de una debida adaptación, cuáles podrían ser los incrementos térmicos a lo largo de este siglo. En el caso de la ZMCM, según proyecciones realizadas por CONAPO (2006), la población dejará de crecer en la década de 2030.

Estudiar el clima de México, un territorio de vastas dimensiones, latitudinalmente alargado y altitudinalmente variable y agreste, se vuelve complejo, más aún todavía si la intención es realizar proyecciones a futuro. Algunos de los trabajos publicados al respecto datan de escasamente dos décadas atrás y muestran claramente las modificaciones que pudieran suceder ante el doblamiento de CO₂ en diferentes escenarios.

El interés en nuestro país por el cambio climático no es tan reciente. La historia abarca desde el compromiso de la comunidad científica y el *Country Study*, en 1995, hasta los futuros prospectos de planes de acción climática, pasando de ser un tema de estudio meramente científico a las políticas del gobierno necesarias ante riesgos ambientales, y por tanto económicos que enfrentará el país. Los estudios acerca de las emisiones de

gases de efecto invernadero, ubican a México en un sitio donde quizá pueda tener una postura más relajada y menos comprometida dado el moderado porcentaje en comparación con las grandes potencias económicas, al emitir menos del 5% del CO₂ que emite China y un 1.3% del total de emisiones de ese gas en el mundo (PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2014).

Los estudios acerca del cambio climático han mostrado diversos resultados, como la utilización de modelos iniciales que, con el paso del tiempo, fueron aumentando en complejidad. Durante el “Primer Taller de Estudio de País: México”, Conde *et al.* (1994) presentaron escenarios básicos para 23 puntos en la República Mexicana y las anomalías por la duplicación de bióxido de carbono de dos modelos de circulación general (GFDL, R30 y CCCM).

En el Segundo Taller de Estudio de País, Magaña (1995) puntualiza que las simulaciones del clima para la región de México deben incluir la interacción océano-atmósfera en los trópicos, en detrimento de modelos que sólo consideran la componente atmosférica del sistema. En el mismo Estudio de País, Conde *et al.* (1995) presentaron avances en la conformación de los escenarios climáticos por regiones en México, utilizando los modelos de circulación antes propuestos en el Primer Taller, obteniendo los cambios en temperatura, precipitación y radiación solar. Señalan que, en general, los cambios de temperatura estimados estarían entre 1 y 2 °C para el modelo CCCM y entre 2 y 3°C para el GFDL R30. La precipitación varía enormemente entre modelos, donde unos muestran una disminución leve y otros muestran incrementos que alcanzan incluso el 50% con el doblamiento de CO₂.

Las proyecciones climáticas parten del conocimiento de las condiciones en un pasado remoto, puesto en evidencia en fósiles vegetales y animales, en el espesor de anillos en los árboles, esqueletos de corales, el aire atrapado en el hielo a grandes profundidades y de sedimentos, entre otras observaciones. Toman en cuenta estas evidencias de las condiciones climáticas remotas y por supuesto también del pasado reciente a través de episodios registrados en la historia humana, como sequías y heladas, y con mayor precisión desde el registro con instrumentos meteorológicos. Los climatólogos desarrollan *modelos* considerando las interacciones de factores tales como la energía del sol, la dinámica atmosférica y oceánica, el hielo marino y las aportaciones de los seres vivos. Se agregan como un factor, además, los aspectos sociales representados por la actividad humana y el contexto socioeconómico en que se desarrolla. Las estimaciones de las emisiones de gases de efecto invernadero han sido un indicador de los niveles de consumo y por tanto de la capacidad económica de las naciones. A partir de esto, los climatólogos crean simulaciones y proyectan las condiciones posibles.

Un modelo climático puede definirse como una representación numérica del sistema climático, basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, y en sus interacciones y en sus procesos de retroefecto (IPCC 2007).

Los Modelos de Circulación General utilizados para México, son los seleccionados para la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (Conde *et al.*, 2011), y son: *MPI-ESM-LR (Max-Planck Institute)*, *GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)*, y el *HADGEM2-ES (Met Office Hadley)*, (UNIAMOS, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM). Los nuevos modelos climáticos tienen una resolución espacial original de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, lo que corresponde a 55×55 km aproximadamente. Mediante un proceso de reducción de escala, los modelos fueron adaptados a $30'' \times 30''$, que en la superficie representa 926×926 metros. Las salidas de estos modelos se estructuran para tres *forzamientos radiativos* (RCP, *Trayectorias de Concentraciones Representativas*, por sus siglas en inglés) los cuales responden al papel fundamental que jugará la población respecto al uso de la energía y al uso del suelo, además del papel de la tecnología, ya que se espera una dependencia de las condiciones climáticas futuras de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Los *forzamientos radiativos* corresponden a la cantidad media de energía solar absorbida por metro cuadrado sobre la superficie y se mide en Watt por metro cuadrado (W/m^2). Se produce un forzamiento radiativo cuando se altera el balance de radiación, ya sea por causas naturales o antropogénicas: es un forzamiento positivo si hay menor albedo y mayor absorción, es decir, una menor emisión de calor (el calor se queda); hay un forzamiento radiativo negativo si hay menor absorción y una mayor emisión de calor (el calor se pierde) (Vargas, 2013). Por supuesto, los RCP son proyecciones y no pronósticos.

Los escenarios de cambio climático que se han considerado para México en la generación del reporte de la “Quinta Comunicación Nacional de México a la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático”, se estructuraron para los forzamientos radiativos de 8.5, 4.5 y $2.6 W/m^2$, reconociendo al CO_2 como principal causante de un forzamiento positivo en las últimas décadas. Un RCP de 8.5 indica un forzamiento que corresponde a 1350 partes por millón (ppm) de CO_2 , con una elevación continua en el futuro. El RCP 2.6 representa 450 ppm, es decir, una condición de declinación, lo cual resulta bastante improbable ya que las presiones al ambiente continúan acorde al crecimiento de la población. Los horizontes de estos escenarios se trabajaron para 2015-2039, considerado como cercano, y 2075-2099 como lejano.

Van Vuuren y Riahi (2008) plantean la duda de si los escenarios efectivamente responderán a las tendencias de las emisiones actuales (que han tenido un rápido crecimiento desde el año 2000) conservando dicha tendencia. Sin embargo, las proyecciones a futuro consideran un crecimiento menor que el actual. Existen toda clase de incertidumbres sobre la mesa: el precio del petróleo y el gas, el desarrollo de la economía de países como China, por ejemplo, los prospectos económicos a futuro y, por supuesto, el desarrollo de las políticas climáticas. En el caso de México cabría plantearse lo que sucederá ante la permanencia de una sociedad no del todo consciente del cambio climático, ni tampoco de las políticas públicas.

La población de México, como la del resto del mundo, enfrentará las modificaciones climáticas con una mayor o menor adaptación según el conjunto de acciones planeadas y llevadas a cabo. La población de las ciudades, mayoría en el mundo, tendrá que asumir los retos de mitigar las emisiones y adaptarse a las modificaciones del clima por efecto del cambio climático, agregando a este último las modificaciones por efecto de la urbanización. Los habitantes de las ciudades gozarán de una “nueva atmósfera”, en la mayoría de los casos más incómoda por calor, aunque también con la posibilidad de mejorar sus condiciones en las ciudades de clima frío o en las que sufren inviernos severos. Experimentarán un clima que podría conllevar efectos en la salud cuando no existan las condiciones de una adecuada adaptación. Esta adaptación, requeriría, entre otras cosas, de una provisión y disponibilidad suficiente de energía eléctrica para climatizar los ambientes que, para entonces, se habrán tornado incómodos o más incómodos de lo que originalmente eran, y quizá hasta peligrosos.

En el caso de la ZMCM, tal como se analizó en el Capítulo 4, los datos de mortalidad (en años climáticamente representativos) por enfermedades del sistema circulatorio y del sistema respiratorio no tienen mayor relación con la ocurrencia de temperaturas altas extremas, posiblemente a causa de la baja frecuencia con que en realidad suceden los periodos cálidos. En cambio la ocurrencia de temperaturas bajas sí lo ha sido, por lo que habría que observar la posibilidad de que estas enfermedades, en un futuro más cálido, tendieran a la baja, sin descartar que una mayor cantidad de periodos de elevada temperatura pudiera desencadenar una mayor mortalidad, al menos en los padecimientos cardiovasculares. Queda por analizar, por ejemplo, lo que sucedería con enfermedades del sistema digestivo.

Es conveniente proyectar a futuro, por lo pronto, en un horizonte cercano y otro lejano, la temperatura del aire percibida por la población urbana como una *sensación térmica*, que es la percepción resultante de la combinación de la temperatura con las condiciones de humedad, viento y otras diferentes variables. El clima regional, la modificación por el

cambio climático global y local por la urbanización definirán estas condiciones. En el caso de la ZMCM, las sensaciones térmicas se estimarán con la utilización de un índice bioclimático (el cual se describirá en la siguiente sección) para un escenario base (1971-2000), un horizonte cercano (2015-2039) y uno lejano (2075-2099) en todos los meses del año.

Modelos de circulación general y escenarios representativos para la ZMCM

Los escenarios de cambio climático que se estructuraron para México, como se comentó anteriormente, corresponden a los tres modelos de circulación general propuestos por el Proyecto Inter-comparación de Modelos Acoplados, fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés) (UNIATMOS, <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>): MPI-ESM-LR (Max-Planck Institute), GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), HADGEM2-ES (Met Office Hadley). Las salidas de estos modelos, en el escenario base (1971-2000), en los horizontes 2015-2030 (cercano) y 2075-2099 (lejano), se utilizaron para cuatro sitios de la ZMCM, dada la extensa superficie que abarca y los diferentes tipos de uso de suelo que la conforman (Cuadro 13, Fig. 34), ubicándose en alguna de las dos grandes zonas climáticas detectadas y estudiadas por Jáuregui (2000) y Estrada *et al.* (2009):

Cuadro 13. Estaciones y observatorios registrados en el Servicio Meteorológico Nacional que se analizaron bioclimáticamente en la ZMCM.

Clave	Estación	Latitud	Longitud	Altitud msnm	Zona climática	Tipo de uso de suelo
9048	Observatorio de Tacubaya, D.F.	19.4036	-99.1961	2,309	Húmeda	Urbano de pie de monte
9008	Observatorio del Col. del Geografía, D.F.	19.3283	-99.1833	2,278	Húmeda	Suburbano de pie de monte
15098	San Martín Obispo, Edo. de Mex.	19.6217	-99.1928	2,255	Húmeda	Suburbano de planicie
9009	Agrícola Oriental, D.F.	19.3994	-99.075	2,235	Seca	Urbano de planicie



Fig. 34. Localización de los sitios en la ZMCM que se analizan bioclimáticamente para el escenario base y los horizontes cercano y lejano. ■ Zona húmeda ■ Zona seca

Tomando en cuenta las salidas de estos modelos, se consideró que el forzamiento radiativo (RCP) 8.5 W/m^2 , el de mayor impacto, es el indicado para realizar las proyecciones futuras de bioclima, por representar una tendencia que corresponde a una emisión de elevación continua de CO_2 . Se muestra a continuación (Cuadro 14) el promedio de las variaciones en la temperatura de los cuatro sitios en la ZMCM para cada modelo de circulación elegido y RCP de 8.5 W/m^2 , las cuales serán utilizadas para el cálculo del bioclima en los horizontes cercano y lejano.

Cuadro 14. Incrementos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) por mes estimados para los horizontes 2015-2039 y 2075-2099 en los cuatro sitios de la ZMCM. Se usaron los modelos *GFDL-CM3*, *MPI-ESM-LR* y *HADGEM2-ES* para un forzamiento radiativo (RCP) de 8.5 W/m^2 . Información proporcionada por UNIATMOS.

2015-2039 (cercano)RCP 8.5 W/m²

<i>MPI-ESM-LR</i>	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Observatorio de Tacubaya, D.F.	1.3	1.1	1.1	1.6	1.9	1.8	1.9	1.9	2.1	2.3	1.9	1.7
Observatorio de Col. del Geografía, D.F.	1.3	1.1	1.1	1.6	1.9	1.8	1.9	1.9	2.1	2.3	1.9	1.7
Estación San Martín Obispo, Edo. de Mex.	1.3	1.0	1.1	1.6	1.9	1.8	1.9	1.9	2.1	2.4	1.9	1.7
Estación Agrícola Oriental, D.F.	1.4	1.1	1.1	1.5	1.8	1.8	1.9	1.9	2.1	2.3	1.9	1.7

<i>GFDL-CM3</i>	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Observatorio de Tacubaya, D.F.	1.3	1.6	1.7	1.4	1.6	1.2	1.7	2.0	2.0	2.3	2.4	1.9
Observatorio de Col. del Geografía, D.F.	1.3	1.6	1.7	1.4	1.6	1.2	1.7	2.0	2.0	2.3	2.4	1.9
Estación San Martín Obispo, Edo. de Mex.	1.2	1.5	1.7	1.3	1.6	1.2	1.7	2.0	2.1	2.4	2.4	1.9
Estación Agrícola Oriental, D.F.	1.4	1.6	1.7	1.3	1.5	1.2	1.7	2.0	2.0	2.3	2.4	1.9

<i>HADGEM2-ES</i>	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Observatorio de Tacubaya, D.F.	0.4	1	1.5	1.7	1.5	1.7	1.9	1.5	1.5	1.8	2.2	1.7
Observatorio de Col. del Geografía, D.F.	0.4	1.0	1.5	1.7	1.5	1.7	1.9	1.5	1.5	1.8	2.2	1.7
Estación San Martín Obispo, Edo. de Mex.	0.2	0.8	1.4	1.7	1.7	1.9	2.0	1.6	1.6	2.1	2.5	2.0
Estación Agrícola Oriental, D.F.	0.5	1.0	1.5	1.6	1.4	1.7	1.9	1.5	1.5	1.8	2.2	1.7

2075-2099 (lejano)

RCP 8.5 W/m²

MPI-ESM-LR

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Observatorio de Tacubaya, D.F.	4.6	4.7	4.8	4.6	4.5	4.7	5.1	5.4	5.3	5.4	5.6	5.7
Observatorio de Col. del Geografía, D.F.	4.6	4.7	4.8	4.6	4.5	4.7	5.1	5.4	5.3	5.4	5.6	5.7
Estación San Martín Obispo, Edo. de Mex.	4.6	4.7	4.8	4.6	4.5	4.7	5.1	5.4	5.3	5.5	5.6	5.7
Estación Agrícola Oriental, D.F.	4.7	4.7	4.8	4.5	4.4	4.7	5.1	5.4	5.3	5.4	5.6	5.7

GFDL-CM3

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Observatorio de Tacubaya, D.F.	5.0	5.5	5.4	5.1	5.3	5.3	6.1	6.2	6.1	6.1	6.0	6.2
Observatorio de Col. del Geografía, D.F.	5.0	5.5	5.4	5.1	5.3	5.3	6.1	6.2	6.1	6.1	6.0	6.2
Estación San Martín Obispo, Edo. de Mex.	5.0	5.4	5.4	5.1	5.3	5.3	6.0	6.2	6.0	6.1	5.9	6.2
Estación Agrícola Oriental, D.F.	5.1	5.5	5.4	5.0	5.2	5.3	6.1	6.2	6.1	6.1	6.0	6.2

HADGEM2-ES

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Observatorio de Tacubaya, D.F.	4.4	4.7	5.2	5.5	5.6	5.7	5.6	5.6	5.8	5.8	5.7	5.6
Observatorio de Col. del Geografía, D.F.	4.4	4.7	5.2	5.5	5.6	5.7	5.6	5.6	5.8	5.8	5.7	5.6
Estación San Martín Obispo, Edo. de Mex.	4.4	4.8	5.3	5.6	5.8	5.9	5.8	5.8	6.0	6.0	5.9	5.8
Estación Agrícola Oriental, D.F.	4.5	4.7	5.2	5.4	5.5	5.7	5.6	5.6	5.8	5.8	5.7	5.6

Tal como se observa en el Cuadro 14, existen en realidad pocas diferencias en los incrementos de temperatura entre los modelo de circulación en los cuatro sitios seleccionados, aunque las salidas proporcionadas por el *GFDL-CM3* muestran en el

horizonte lejano una anomalía mayor que los otros dos. Estas diferencias podrían quedar de manifiesto en los climogramas bioclimáticos y las sensaciones térmicas resultantes.

De la misma manera, las diferencias de las salidas de los modelos entre los cuatro sitios de la ZMCM son mínimas, lo que unificaría el criterio de utilizar, para toda la ciudad, un mismo valor representativo (para cada mes). Aun así, para la elaboración de los climogramas bioclimáticos, se utilizaron los valores correspondientes a las salidas de los modelos para cada lugar en específico. Estas anomalías se sumarán a la climatología base correspondiente a cada sitio (media de las temperaturas mínima, máxima y media durante el periodo 1971-2000) para obtener las proyecciones futuras en las sensaciones térmicas.

Además de los valores agregados (las salidas de los modelos a las medias de temperatura del escenario base) a la climatología base, es necesario añadir el efecto generado por la urbanización. Para esto, se recurrió a los resultados del Capítulo 3 que exhiben una isla de calor ponderada por extensión de cada isoterma y la población contenida en ella. Los datos del Cuadro 5 se agregaron a las medias de temperatura máxima y mínima del escenario base para cada mes en cada uno de los sitios seleccionados dentro de la ciudad, obteniendo así un resultado más acorde a la realidad urbana de la zona:

Clima regional + modificación climática global + efecto urbano local = clima urbano

El clima urbano así definido se traduce en cambios en las sensaciones térmicas, aun con mayores modificaciones en el caso de los escenarios a futuro, como se verá a continuación.

5.1 Índices bioclimáticos y climogramas. Escenario base 1971-2000.

En México la mayoría de la población urbana ha preferido ubicarse en altitudes mayores a los 1000 metros sobre el nivel del mar (Gutiérrez y González, 2007). Si bien el proceso histórico de la nación explica gran parte de esta concentración, se deben reconocer también los beneficios bioclimáticos de una ubicación a gran altitud en regiones tropicales. Aproximadamente el 30% de la población total se ubica en la región centro del país. El crecimiento acelerado de las zonas metropolitanas que allí se asientan, ha originado importantes modificaciones en el medio; entre ellas, el aumento de temperatura debido al proceso de urbanización. El conjunto de modificaciones atmosféricas ocasionará que la ZMCM sufra, por tanto, un efecto combinado que se verá reflejado -posiblemente- en una

mayor incomodidad por calor y en una afectación a la salud de sus habitantes (Luyando y Tejeda, 2010). Se experimentarán nuevas sensaciones térmicas que pueden significar, sin embargo, ambientes más cómodos por una disminución de las horas frías.

La sensación térmica se valora a través de modelos computacionales de balance de energía o de índices de bienestar (o de *comfort*) en ambientes intra o extramuros. Los modelos surgieron de la necesidad de estimar cuantitativamente los efectos combinados de las variables que intervienen en los intercambios físicos entre el cuerpo humano y el ambiente sobre las respuestas fisiológicas y sensoriales de las personas. En principio, mientras más variables se incluyan, más precisa será la evaluación, lo que es justamente el objetivo de los modelos de balance de energía (Tejeda *et al.*, 2011). Para ello, no sólo se toman en cuenta las variables climáticas como son la temperatura, humedad, radiación y viento sino que, también, se agregan la resistencia térmica de la ropa y el nivel de actividad del individuo.

Estos modelos -o índices- bioclimáticos, desarrollados desde principios del siglo pasado, se categorizan en tres grupos (Moran y Epstein, 2006): "*rational indices*", "*empirical indices*" y "*direct indices*". Los dos primeros contienen índices complejos que requieren del conocimiento de variables fisiológicas y ambientales, y su uso no es sencillo. Los que pertenecen al último grupo son índices más simples que funcionan con variables ambientales. Los autores consideran que el índice WBGT (Wet bulb globe temperature), desarrollado por Yaglou y Minard es el más usado en el mundo y no requiere de relaciones fisiológicas.

Dentro de los índices pertenecientes al segundo grupo se encuentra el desarrollado por Missenard (1937), *Temperatura Resultante*, o *Temperatura Efectiva* (TE). Es el índice seleccionado para evaluar el ambiente bioclimático de la ZMCM. Los índices bioclimáticos y su aplicación son temas aun poco recurrentes en la literatura nacional, existen escasas publicaciones relativas al desarrollo, utilización y nuevas propuestas.

Un índice bioclimático más bien simple, como es el de la Temperatura Efectiva de Missenard (1937) (TE), representa la temperatura del aire en calma que experimentaría un sujeto en reposo y a la sombra, si la humedad relativa fuera del 100%. Requiere para su uso del conocimiento de la temperatura en grados centígrados y la humedad relativa en porcentaje. Utilizando este índice, Jáuregui, Cervantes y Tejeda (1996) mostraron que el número de días por año en el centro de la ciudad con noches frías y frescas se ha reducido por efecto de la existencia de la isla de calor. De la misma manera, los mapas de isolíneas de TE durante la temporada cálida son acordes a la configuración de la isla de calor. Comparado con otras ciudades, el bioclima de la ciudad de México puede ser

considerado como suave, pues además de tener noches frescas y frías en la época invernal, las condiciones predominantes en la época cálida son de neutralidad, con presencia de algunos periodos cálidos, al parecer, por efecto del cambio climático.

Es por esto que Jáuregui y Tejeda (2001) realizaron un estudio bioclimático de la ciudad de México y su área conurbada, con proyecciones a la segunda mitad del siglo XXI con una duplicación del CO₂ y las tendencias de temperatura de una estación urbana. Los resultados muestran cómo una gran parte de la ciudad (centro y noreste) se desplazará de la categoría de “fresca y cómoda” a cálida en los meses más calurosos. No sucederá lo mismo con las regiones sur y poniente de la ciudad, que conservarán un ambiente más agradable.

Sin embargo, en este trabajo publicado no se tomó en cuenta la aclimatación de los habitantes y un posible menor ritmo de crecimiento de la población y expansión de la ciudad. Este índice bioclimático (Temperatura Efectiva) ha sido utilizado en varios de los trabajos realizados en México para la estimación de las condiciones bioclimáticas en el “Atlas Nacional del Instituto de Geografía” (IG, 2007) y en el “Reporte para la Cuarta Comunicación Nacional” en la sección de Asentamientos Humanos (2009). También fue aplicado por Méndez (2004) en la estimación de tarifas eléctricas en Veracruz.

Para una mejor comprensión y precisión de los resultados, se elaboraron climogramas bioclimáticos o bioclimogramas que consisten en una representación de las condiciones del clima a lo largo del tiempo; en este caso, de las condiciones bioclimáticas en forma estacional y a lo largo de un día.

Estimación del índice bioclimático de la Temperatura Efectiva y elaboración del bioclimograma

Aun disponiendo de índices complejos, que aportarían resultados aparentemente más precisos, el índice de la Temperatura Efectiva de Missenard (1937) permite la utilización de variables climáticas de fácil acceso (temperatura y humedad relativa) para efectuar los cálculos en los escenarios futuros. Este índice, al igual que otro también simple como es la Temperatura Aparente (AT) (Steadman, 1979) utilizado ampliamente en estudios bioclimáticos actualmente, se pueden calcular para una amplia gama de condiciones ambientales y, además, encuentran una conformidad significativa de sus valores con otro más como es un índice recientemente desarrollado, el Universal Thermal Climate Index (UTCI) (Blazejczyk, 2012).

La Temperatura Efectiva, a pesar de su sencillez, ofrece resultados satisfactorios pues es suficientemente sensible tanto en temperaturas bajas como en altas. A modo de comparación, se realizaron algunas pruebas utilizando otro índice, el Humidex, desarrollado en Canadá en 1979 por J. M. Masterton y F. A. Richardson del Canada's Atmospheric Environment Service. Este índice utiliza la temperatura del punto de rocío en vez de la humedad relativa.

Los resultados de la prueba, con datos para un escenario base 1970-2000 y un horizonte lejano (2075-2099) para el modelo climático HADLEY RCP 8.5 W/m² en el Observatorio de Tacubaya, mostraron ser sensibles cuando las temperaturas son elevadas y coincide con una humedad suficientemente alta para que ocurra un ambiente no confortable. En temperaturas bajas, la sensación es una sola, indiferenciada: de “pequeño disconfort o ninguno”. En lugares donde los veranos son cálidos y húmedos y los inviernos son severos, un índice como el Humidex es recomendable para la época de calor, y uno que estime las condiciones que propicien la pérdida de calor en el cuerpo (como el Wind Chill) para la época fría.

En el caso de la ZMCM, ninguno de los dos extremos ocurre, tanto por frío como por calor, y menos si es húmedo, por lo que un índice como el de Missenard es suficiente para mostrar las diferencias en las sensaciones térmicas. Además, según Macpherson (1962), entre más simple sea el índice elegido, más probabilidades tendrá de ser satisfactorio.

Tal como se mencionó anteriormente, Missenard (1937) definió la temperatura efectiva (TE) como el equivalente a la temperatura del aire en calma que percibiría un sujeto sedentario, sano, a la sombra, vestido con ropa de trabajo, si la humedad relativa fuera del 100%. (Tejeda *et al.*, 2011). Su expresión matemática es:

$$TE = T_a - 0.4(T_a - 10)(1 - HR/100) \quad (1)$$

T_a es la temperatura del aire en grados centígrados y HR la humedad relativa en porcentaje.

Para obtener un bioclima representativo de la ZMCM en el escenario base y los horizontes cercano y lejano, fue necesario calcular los datos horarios medios mensuales con el método propuesto por Tejeda *et al.* (1991), Tejeda y Rivas (2001) y Tejeda *et al.* (2008). Incluyen también la humedad relativa horaria a partir de la Temperatura mínima y máxima observadas y algunos parámetros de ajuste a , b y c :

$$T_{hor} = T_{min} + (at^b e^{ct})(T_{max} - T_{min}) \quad (2)$$

$$HR_{hor} = HR_{min} + (1 - at^b e^{ct})(HR_{max} - HR_{min}) \quad (3)$$

En estas fórmulas T_{hor} es la temperatura horaria promedio mensual, HR_{hor} es la humedad relativa horaria promedio mensual, $a=0.096$, $b=2.422$, $c=-0.339$, t es la hora del día a partir del amanecer, T_{max} , T_{min} , HR_{max} y HR_{min} , son los promedios mensuales 1971-2000 de temperaturas máxima y mínima, y de humedad relativa máxima y mínima (Tejeda *et al.* 2011).

A manera de comparación en la obtención de temperaturas horarias, se realizaron pruebas también con el programa Meteonorm. Para esto, se utilizó información del Observatorio de Tacubaya de los años 2000 al 2009 para tres meses representativos climáticamente (enero, mayo y julio) y se comparó con los resultados obtenidos con el método de Tejeda y con los obtenidos por Meteonorm. Las pruebas estadísticas aplicadas muestran que no existe diferencia significativa entre las medias de los datos observados y los calculados con ambos métodos. Sin embargo, la diferencia radica en la hora de ocurrencia de la temperatura, donde tanto el método de Tejeda como Meteonorm se desplazan, en uno u otro mes, antes o después de la hora de ocurrencia en los datos observados, aunque Tejeda se aproxima más a la realidad.

Posteriormente se calcularon los valores horarios medios mensuales (1971-2000) a los cuales se les agregaron los incrementos ó anomalías de las salidas de los escenarios para los horizontes 2015-2039 (cercano) y 2075-2099 (lejano) de los modelos *GFDL-CM3*, *MPI-ESM-LR* y *HADGEM2-ES* proporcionados por UNIATMOS. Además, como se había comentado, se consideró también el efecto del calentamiento urbano a través de la estimación de la isla de calor ponderada (Capítulo 3) con los valores de la Tabla 3.2.

Estos resultados se emplean como variables de entrada para el cálculo del Índice de Temperatura Efectiva (TE). El procedimiento se elabora para cada uno de los sitios en la ZMCM.

Dado que es necesario establecer una temperatura neutra o de confort T_n (situación en que el individuo no experimentaría ninguna incomodidad térmica) y que esta temperatura varía según la aclimatación de los individuos, se procedió a utilizar el modelo propuesto por Auliciems y de Dear (1986), válido para una humedad relativa del 50%:

$$T_n = 17.6 + 0.31 T_{em} \quad (4)$$

donde T_n es la temperatura neutra y Tem es la temperatura media mensual. Después de la obtención de la temperatura neutra para cada sitio, se calcularon los intervalos de confort alrededor de la temperatura neutra elaborada como una tabla de sensaciones, por lo que se optó por tomar el enfoque propuesto por Auliciems y Szokolay (1997) donde proponen que ± 1.75 °C cuando el periodo es mensual o menor y de $\pm 2^\circ$ para periodos anuales en el periodo de adaptación, de modo que los límites superior e inferior del intervalo de temperatura de confort son:

$$T_{n_{superior}} = 19.6 + 0.31Tem \quad (5)$$

$$T_{n_{inferior}} = 15.6 + 0.31Tem \quad (6)$$

Missenard propuso, dentro de la escala de sensaciones térmicas, que la neutralidad o situación de confortabilidad (sin peligro alguno de tensión por efecto de la temperatura) se ubica entre los 17 y los 21°C, es decir, un intervalo de 4 grados.

Sustituyendo el valor de la temperatura media mensual por la temperatura neutra inferior y superior en la ecuación 1 y un valor de 50% para la humedad relativa, se obtienen los valores de temperatura efectiva para el intervalo de confort de cada mes para cada sitio considerado en la zona metropolitana.

$$TE = T_{n_{inferior}} - 0.4(T_{n_{inferior}} - 10)(0.5) \quad (7)$$

$$TE = T_{n_{superior}} - 0.4(T_{n_{superior}} - 10)(0.5) \quad (8)$$

Habiendo realizado los cálculos para obtener la TE de forma horaria, (donde ya se tomó en cuenta la presencia del calentamiento urbano a través de la estimación de la isla de calor ponderada y las salidas de los modelos para el RCP 8.5) se aplican los criterios establecidos en las ecuaciones 7 y 8 para la elaboración de los bioclimogramas a partir de los intervalos que se muestran en el Cuadro 15. La escala se propone con un cambio en la sensación térmica cada dos grados (°C) pues se conoce que un incremento o disminución de 1°C no es perceptible para el organismo humano, así que se tomaron 2°C de diferencia como un límite para reconocer un cambio. Se puede observar que en los estudios de bioclima que se han realizado en otras ciudades y con diversos índices, existe un fuerte sesgo al tener escalas de sensaciones con diferente número y valoración de intervalos (Blazejczyk, 2012).

Cuadro 15. Escala de sensaciones térmica utilizada para la elaboración de los bioclimogramas.

	Muy frío
--	----------

	Frío
	Frío moderado
	fresco
	Neutro
	Cálido
	Muy cálido
	Cálido pesado
	Cálido extremo

Cabe mencionar que en los análisis no se pretende establecer valores absolutos representativos de sensaciones térmicas, sino más bien establecer las diferencias entre un escenario base y los escenarios futuros a manera de mostrar las modificaciones por la influencia del cambio climático global más el cambio climático local. Por lo tanto, el índice bioclimático utilizado, los métodos de obtención de valores horarios y la isla de calor ponderada logran este cometido.

Escenario base 1971-2000

A partir de la elaboración de los climogramas bioclimáticos (o bioclimogramas) para la ZMCM se resumen los resultados en tablas simplificadas (Cuadros 16 y 17), con un menor número de intervalos a los mostrados en el Cuadro 15 y en porcentajes de número de horas por intervalo para una mejor comprensión. En lo referente al escenario base, es decir, al escenario del periodo 1971-2000 en el cual se consideran las condiciones que prevalecen actualmente, los cuatro sitios en la ZMCM poseen un comportamiento donde se alcanza la **neutralidad térmica** entre el 22 y el 25% del tiempo a lo largo del año. La mayor parte corresponde a sensaciones más bien **frescas** y **frías** (más del 50% del tiempo), sobre todo en los sitios con características suburbanas como el Observatorio del Colegio de Geografía, en Ciudad Universitaria, y aun más en la estación San Martín Obispo, en la zona periurbana de la Ciudad de México. La sensación térmica **cálida** ocurre menos de la tercera parte del tiempo, y la **muy cálida** ocurre en las horas del mediodía, notablemente en el mes de mayo.

En la estación Agrícola Oriental esta sensación térmica se percibe también en el mes de junio posiblemente por la influencia del efecto urbano en una zona prácticamente sin áreas verdes. En la estación San Martín Obispo, al norte de la mancha urbana, esta

sensación es inexistente. La incomodidad por calor es mayor en la zona oriente de la ciudad.

La respuesta fisiológica de la población ante la prevalencia de temperaturas bajas puede derivar en una mayor tendencia hacia las enfermedades respiratorias y del sistema circulatorio, como se muestra en el Capítulo 4 de esta tesis. Velasco (2014) encontró una predisposición histórica a las infecciones respiratorias agudas relacionadas con bajas temperaturas.

En resumen, las sensaciones térmicas de la población de la ZMCM revelan más de dos terceras partes del tiempo con situación de **neutralidad** y **fresco-frío** y menos de una tercera parte de sensación **cálida**, en el escenario base. La ciudad, aun con el efecto urbano, es un sitio con un clima benigno y confortable, aun quizá demasiado fresco y frío en las mañanas de la mayor parte del año.

Cuadro 16. Porcentaje de horas anuales bajo distintas sensaciones térmicas para cuatro ubicaciones dentro de la ZMCM. Resumido de los bioclimogramas correspondientes al escenario base 1971-2000.

	Frío	Fresco	Neutro	Cálido	Muy cálido	Cálido pesado
Observatorio de Tacubaya	26	26	22	23	3	0
Observatorio del Col. de Geografía	30	24	22	22	2	0
Est. Agrícola Oriental	23	27	23	24	3	0
Est. S. M. Obispo	37	21	25	17	0	0

5.3 Bioclimatología horizontes 2015- 2039 (cercano) y 2075 – 2099 (lejano)

Tomando el escenario base como el periodo de comparación que representa el estado conocido del clima, los climogramas correspondientes a los horizontes cercano y lejano (con un forzamiento radiativo de 8.5 W/m^2 para los modelos de circulación *GFDL-CM3*, *MPI-ESM-LR* y *HADGEM2-ES*) muestran las tendencias del calentamiento en las sensaciones térmicas bajo los efectos del cambio climático global y por el efecto,

además, del crecimiento mismo de las ciudades. Los resultados, sin embargo, no son ningún hallazgo inesperado, ni lo son para ninguno de los escenarios que se plantean a futuro con un clima más cálido y sensaciones térmicas de mayor incomodidad, cuando menos durante los meses más cálidos. Las temperaturas durante el día y el calor que permanece atrapado en la ciudad durante la noche propiciarían situaciones de escaso descanso para la población y posiblemente el recrudecimiento de algunas enfermedades vinculadas al *estrés* por calor.

Es interesante detectar diferencias en las sensaciones térmicas entre los resultados con los distintos modelos de circulación, pero sobre todo interesa mostrar la diferencia que se presenta respecto al escenario base.

De los climogramas que se presentan más adelante, se resumen los resultados de las condiciones bioclimáticas en el Cuadro 17 para los horizontes cercano y lejano. La escala de sensaciones se estableció mediante intervalos de 2°C por arriba y por debajo de la condición de neutralidad.

Cuadro 17. Porcentaje de horas anuales bajo distintas sensaciones térmicas (Índice de Misenard) para las cuatro ubicaciones dentro de la ZMCM. Resumido de los bioclimogramas correspondientes a los horizontes cercano y lejano (Figuras 41 a la 44).

Obs. de Tacubaya	RCP 8.5	Frío	Fresco	Neutro	Cálido	Muy cálido	Cálido pesado
MPI-ESM-LR	2015-2039	12	28	23	25	11	0
	2075-2099	2	14	32	27	24	1
HADGEM2-ES	2015-2039	12	30	23	25	11	0
	2075-2099	2	11	30	29	23	4
GFDL-CM3	2015-2039	10	30	23	26	11	0
	2075-2099	1	10	31	28	28	2

Obs. Col. de Geografía	RCP 8.5	Frío	Fresco	Neutro	Cálido	Muy cálido	Cálido pesado
MPI-ESM-LR	2015-2039	20	27	23	23	7	0
	2075-2099	5	16	31	26	23	0
HADGEM2-	2015-2039	19	29	22	24	6	0

ES	2075-2099	7	14	30	26	21	1
	2015-2039	30	24	22	22	2	0
GFDL-CM3	2075-2099	5	16	31	26	23	0

Est. Agrícola Oriental	RCP 8.5	Frío	Fresco	Neutro	Cálido	Muy cálido	Cálido pesado
MPI-ESM-LR	2015-2039	15	27	24	22	12	0
	2075-2099	3	11	27	30	23	6
HADGEM2-ES	2015-2039	12	26	25	23	13	0
	2075-2099	3	11	27	30	23	6
GFDL-CM3	2015-2039	10	30	22	24	14	0
	2075-2099	3	11	30	27	25	3

Est. S.M. Obispo	RCP 8.5	Frío	Fresco	Neutro	Cálido	Muy cálido	Cálido pesado
MPI-ESM-LR	2015-2039	23	27	22	23	6	0
	2075-2099	9	20	28	26	16	0
HADGEM2-ES	2015-2039	24	27	22	23	5	0
	2075-2099	9	15	31	25	19	2
GFDL-CM3	2015-2039	22	27	23	23	5	0
	2075-2099	4	15	29	26	22	4

El análisis comparativo de los climogramas (Figuras 35 a la 38) muestra diferencias en cuanto a las sensaciones térmicas para todos los modelos y escenarios utilizados respecto al escenario base.

En el Observatorio de Tacubaya, con un uso de suelo densamente urbanizado, la sensación térmica **fría** en el escenario base pasa de un 26% de horas anuales a sólo un 2% en el horizonte 2075-2099; las horas **cálidas** y **muy cálidas** ganan terreno al dominar el 50% del tiempo, donde la sensación **muy cálida** prevalecería ya una cuarta parte del tiempo al año comparado con un modesto 3% del escenario base. La sensación de **cálido pesado** se vuelve una realidad, inexistente en el escenario base, ocupando para el modelo HADGEM2-ES un 4% del total de horas anuales a partir del mes de abril en horas del medio día, y en el mes de mayo incluso desde las 11:00. La sensación de **neutralidad** sólo se percibirá en la madrugada y primeras horas de la mañana durante casi todo el año, las noches serán cálidas lo cual resultará incómodo en los ambientes intramuros por el calor que conservarán las edificaciones (Fig. 35):

Observatorio de Tacubaya, D.F.

Modelo de circulación: GFDL-CM3

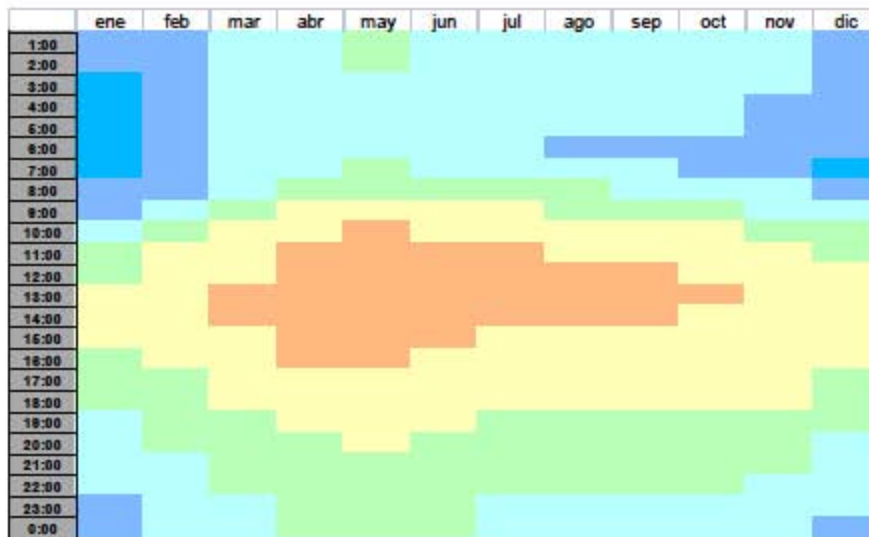
2075-2099 (horizonte lejano)



Observatorio de Tacubaya, D.F.

Modelo de circulación: HADGEM2-ES

2015-2039 (horizonte cercano)



Observatorio de Tacubaya, D.F.

Modelo de circulación: HADGEM2-ES

2075-2099 (horizonte lejano)

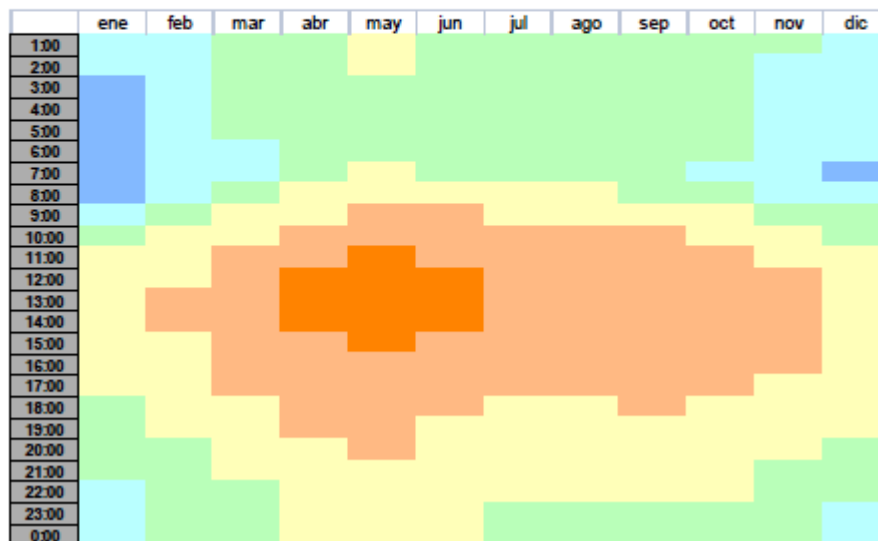


Fig. 35. Climogramas bioclimáticos para el Observatorio de Tacubaya en los diferentes modelos de circulación general (*GFDL-CM3*, *MPI-ESM-LR* y *HADGEM2-ES*) para escenarios cercano (2015-2039) y lejano (2075-2099) con un forzamiento radiativo de 8.5 W/m^2 .

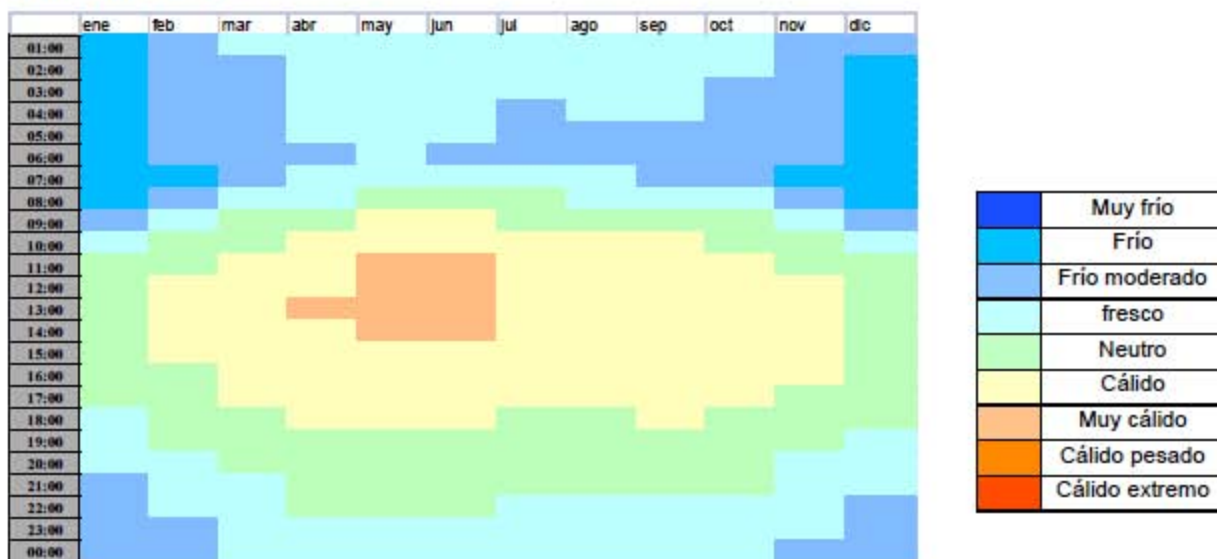
La estación urbana Agrícola Oriental, en la planicie de la cuenca y al centro-oriente de la ZMCM, sufre modificaciones aun más drásticas que Tacubaya. En el escenario 2015-2039 las horas **muy cálidas** abarcan desde la primavera hasta el mes de octubre desde las 11:00 hasta las 15:00 o 16:00. En el horizonte lejano se aprecia, aproximadamente para todos los modelos, una disminución de las horas **frías** (de 23% en el escenario base a sólo un 3%), una cuarta parte del tiempo en **neutralidad** térmica (sólo por las noches y madrugadas) y más del 50% de horas **cálidas** y **muy cálidas**, las cuales se distribuyen no sólo en los meses más calurosos del año, sino que se extienden hasta el mes de noviembre (Fig. 35).

El uso de suelo urbano, densamente construido y con escasez de áreas verdes, como el que se encuentra en los alrededores del Observatorio de Tacubaya y la estación Agrícola Oriental, son un patrón que se repite en grandes zonas habitacionales-comerciales de la ZMCM, como son las delegaciones Iztapalapa, Iztacalco, Azcapotzalco, Venustiano Carranza y en municipios del Estado de México como Tlalnepantla, Cuautitlán Izcalli, zonas de Naucalpan, Cuautitlán, Chimalhuacán y de forma intensiva en La Paz,

Ixtapaluca, Valle de Chalco, Ecatepec, Nezahualcóyotl. El cambio de clima potenciado por el efecto urbano podría tener serias consecuencias en esos sectores caracterizados por un uso de suelo anárquico, donde las edificaciones suelen pertenecer a estratos socioeconómicos bajos y marginados en una amalgama de actividades que reportan, en general, bajos ingresos y baja calidad de vida (Fig. 36):

Estación Agrícola Oriental, Delegación Iztacalco, D.F.

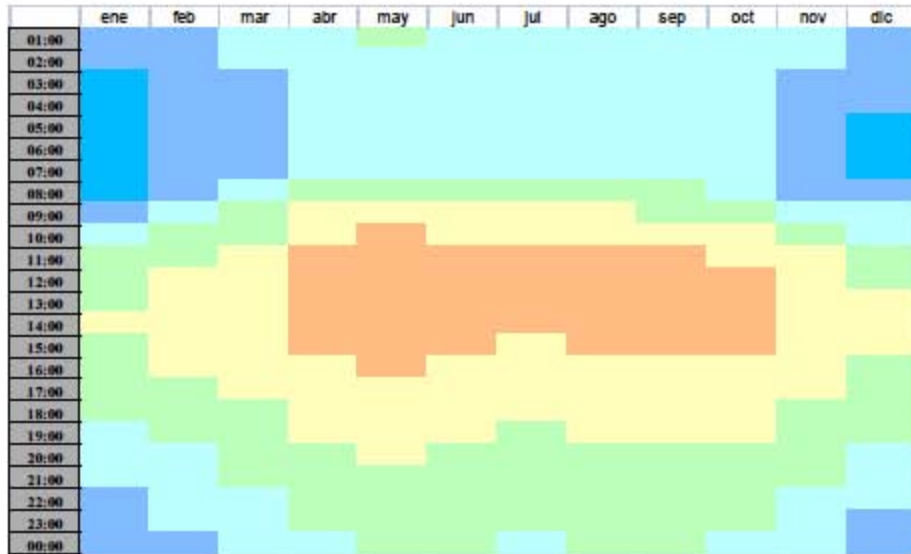
Escenario base (1971-2000)



Estación Agrícola Oriental, Delegación Iztacalco, D.F.

Modelo de circulación: MPI-ESM-LR

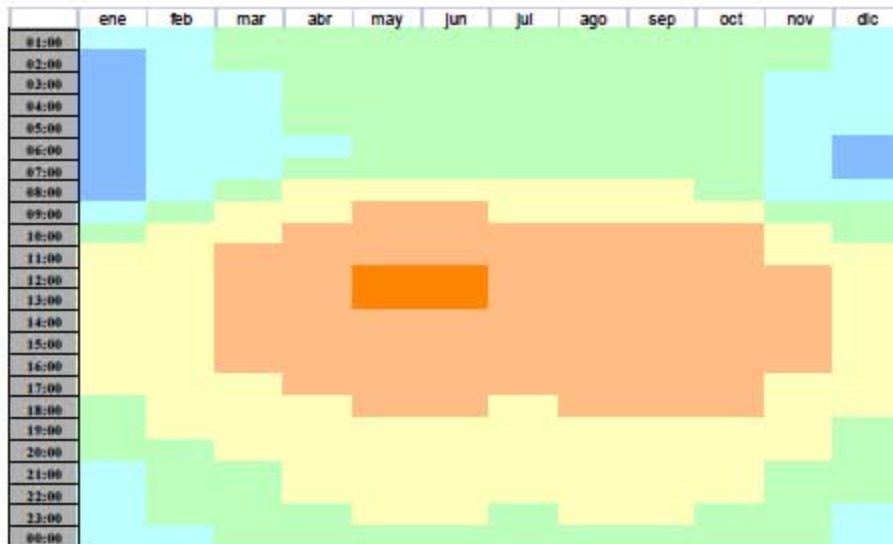
2015-2039 (horizonte cercano)



Estación Agrícola Oriental, Delegación Iztacalco, D.F.

Modelo de circulación: MPI-ESM-LR

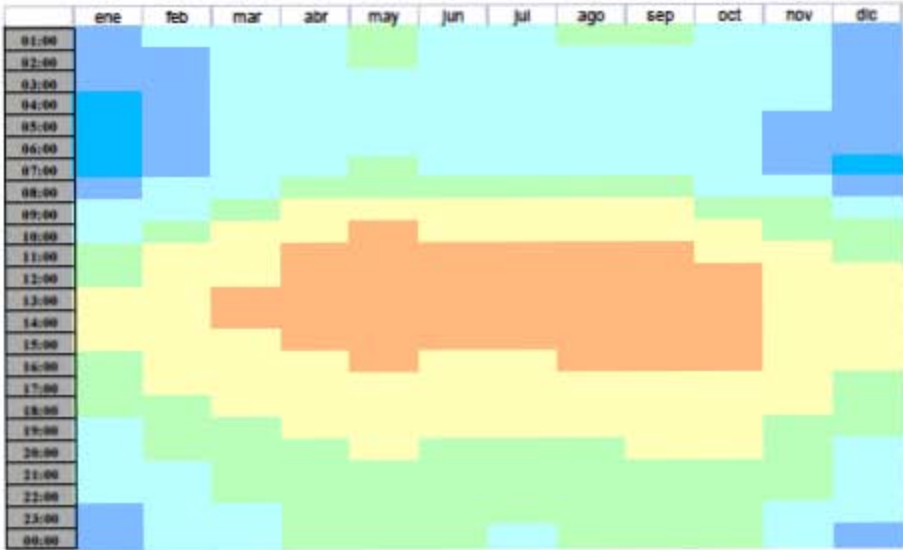
2075-2099 (horizonte lejano)



Estación Agrícola Oriental, Delegación Iztacalco, D.F.

Modelo de circulación: GFDL-CM3

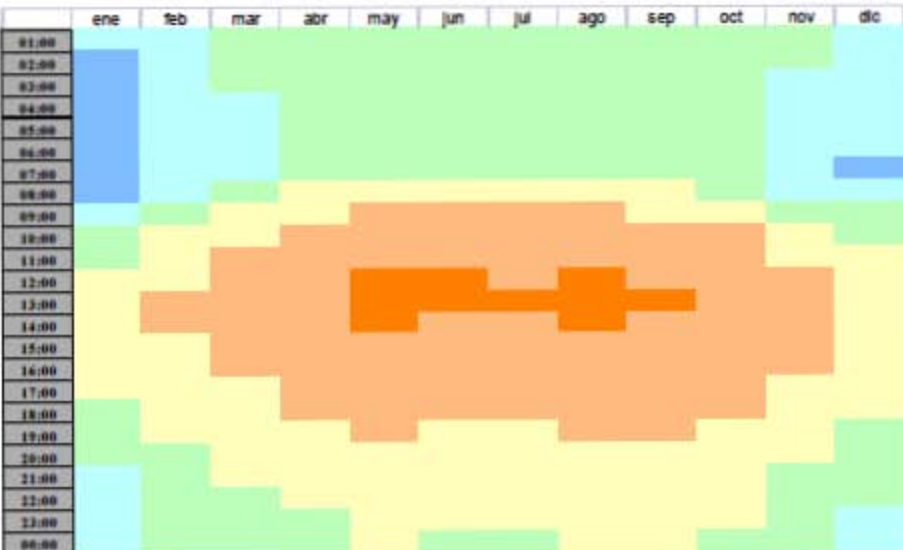
2015-2039 (horizonte cercano)



Estación Agrícola Oriental, Delegación Iztacalco, D.F.

Modelo de circulación: GFDL-CM3

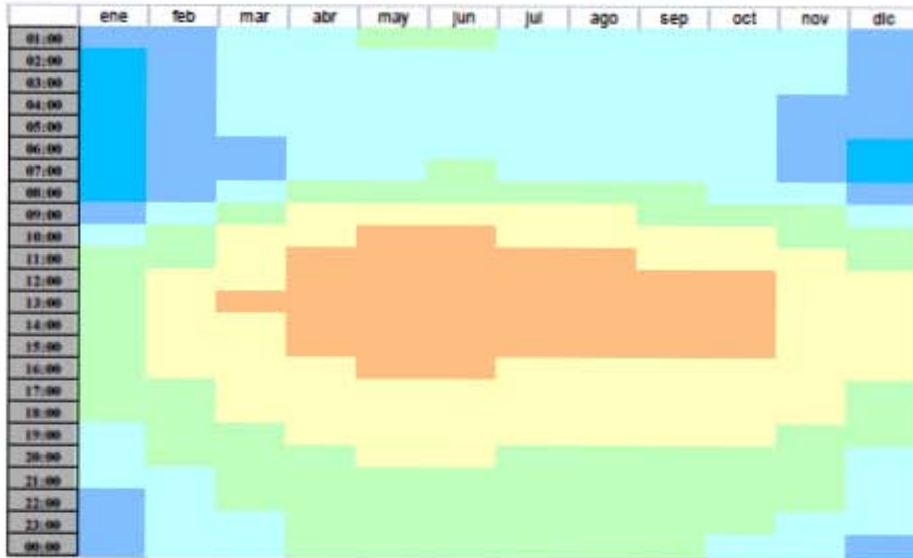
2075-2099 (horizonte lejano)



Estación Agrícola Oriental, Delegación Iztacalco, D.F.

Modelo de circulación: HADGEM2-ES

2015-2039 (horizonte cercano)



Estación Agrícola Oriental, Delegación Iztacalco, D.F.

Modelo de circulación: HADGEM2-ES

2075-2099 (horizonte lejano)

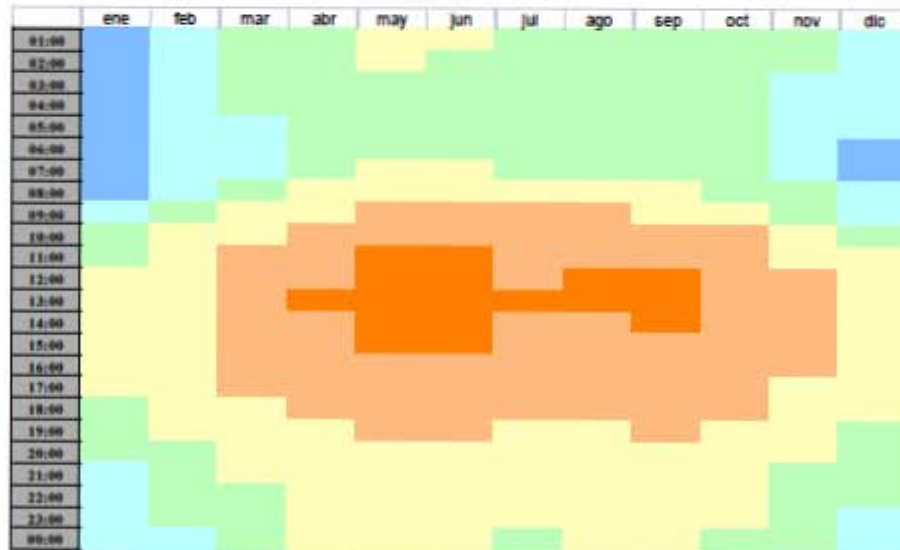


Fig. 36. Climogramas bioclimáticos para la estación Agrícola Oriental en los diferentes modelos de circulación general (*GFDL-CM3*, *MPI-ESM-LR* y *HADGEM2-ES*) para

escenarios cercano (2015-2039) y lejano (2075-2099) con un forzamiento radiativo de 8.5 W/m^2 .

En el Observatorio del Colegio de Geografía, dentro del campus de Ciudad Universitaria y en sus alrededores, la sensación de **neutralidad** térmica se desplazará, en el horizonte cercano, a las horas nocturnas en todas las estaciones del año menos en el invierno y a algunas horas de la mañana, tomando su lugar la sensación **cálida** que permanece mientras el sol se encuentre sobre el horizonte. Sólo en otoño e invierno se percibe el **frío moderado** en las horas de la madrugada, y el **frío** se restringe a las madrugadas invernales. La sensación de **muy cálido** se extiende cuatro meses más en las horas de medio día, en comparación con el escenario base (Fig. 37).

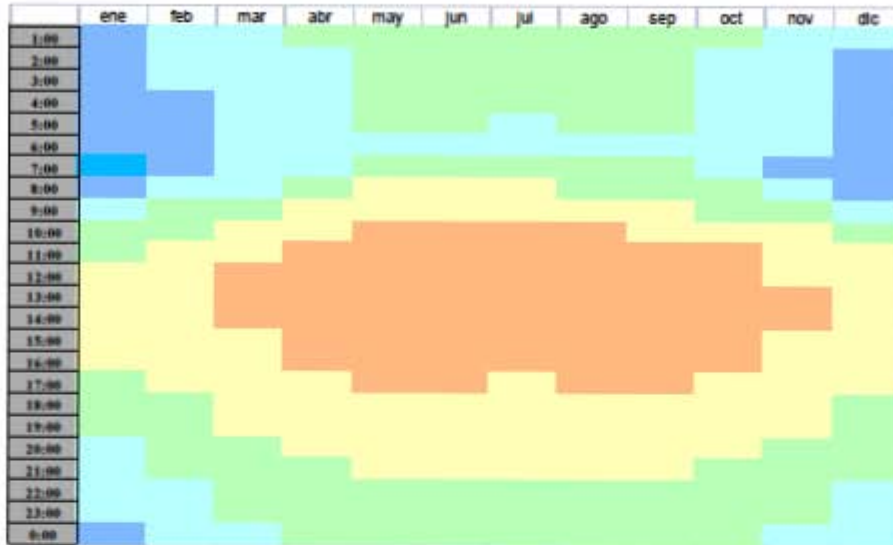
En el horizonte lejano, la **neutralidad** térmica ocupa una tercera parte de las horas anuales ubicándose durante las madrugadas y primeras horas de la mañana, ocupando, durante los meses cálidos del año, lo que antes correspondía a la sensación de **fresco** o de **frío moderado**, ahora inexistentes. A pesar de ser una zona con presencia de áreas verdes y con posibilidad de seguir conteniéndolas en el futuro, el calor la alcanzará en casi el 50% de las horas anuales, e incluso el modelo HADGEM2-ES le otorga un par de horas de **cálido pesado** durante el mediodía de los meses de abril y mayo.

El uso de suelo en el Observatorio del Colegio de Geografía y sus alrededores no es un patrón que se repita con frecuencia en la ZMCM pues alterna edificaciones y áreas verdes que son fuentes de humedad y sumideros de calor. Algunas zonas residenciales al suroeste y poniente de la ciudad cuentan con áreas vegetadas como jardines y camellones en las vías de comunicación. Por ejemplo, el bosque de Chapultepec, al poniente de la ciudad, ejerce una influencia climática considerable en las calles aledañas, sobre todo viento abajo (Fig. 37):

Observatorio del Colegio de Geografía

Modelo de circulación: MPI-ESM-LR

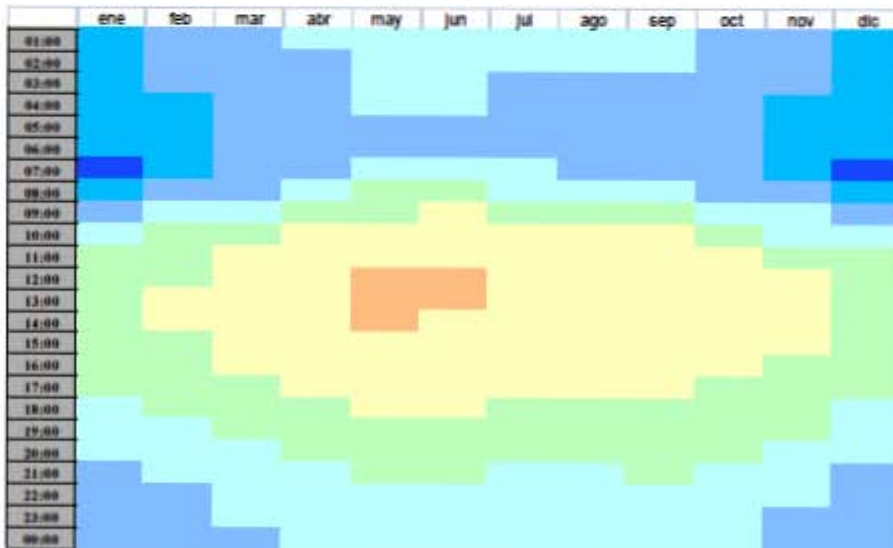
2075-2099 (lejano)



Observatorio del Colegio de Geografía

Modelo de circulación: GFDL-CM3

2015-2039 (horizonte cercano)



Observatorio del Colegio de Geografía

Modelo de circulación: HADGEM2-ES

2075-2099 (horizonte lejano)

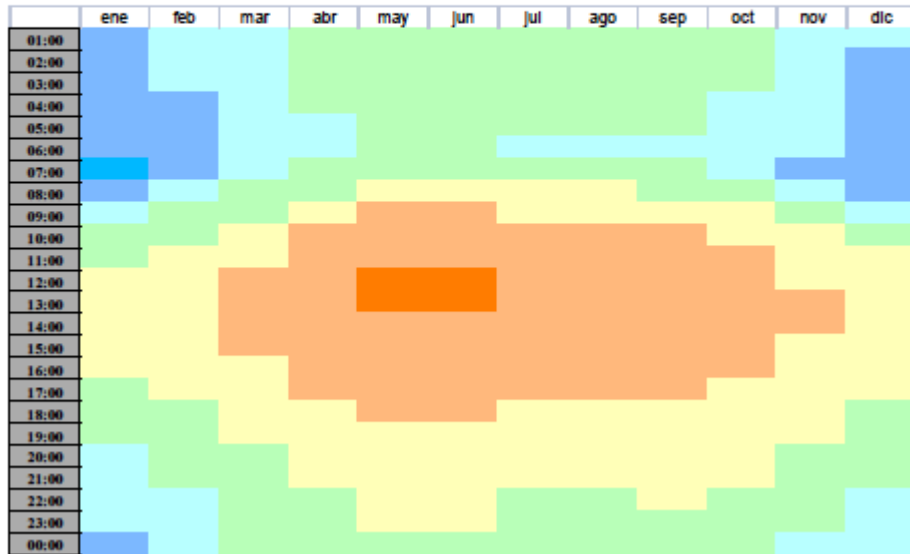


Fig. 37. Climogramas bioclimáticos para el Observatorio del Colegio de Geografía, UNAM, en los diferentes modelos de circulación general (*GFDL-CM3*, *MPI-ESM-LR* y *HADGEM2-ES*) para escenarios cercano (2015-2039) y lejano (2075-2099) con un forzamiento radiativo de 8.5 W/m^2 .

La estación de San Martín Obispo, ubicada en el municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México, se sitúa en un ambiente suburbano donde se asientan zonas habitacionales y parques industriales, tal como sucede en gran parte del norte de la ZMCM. Las zonas habitacionales suelen ser desarrollos de baja infraestructura con casas deficientemente construidas y poca vegetación. Los parques industriales se localizan entre vías de comunicación bien definidas y cuentan con alguna vegetación en el interior, como la de algunos campos deportivos y la que constituye una pequeña cantidad de árboles.

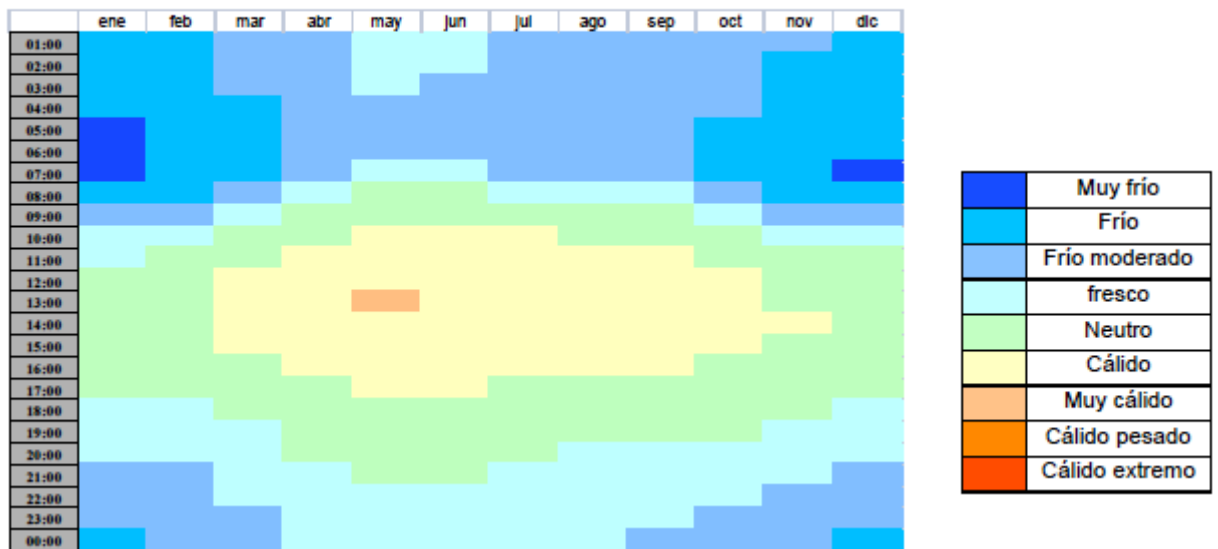
El climograma del escenario base para San Martín Obispo (Fig. 38) muestra las condiciones de este sitio periurbano, alejado de la influencia térmica de la urbanización que es característica de la zona centro y oriente de la ZMCM. La sensación térmica de **frío** (muy frío, frío y frío moderado) ocurre poco más de la tercera parte de las horas anuales durante la madrugada y primeras horas de la mañana de todos los meses menos los más cálidos. La sensación **cálida** abarca de marzo a octubre sólo el 17% del tiempo y es precedida y seguida de unas horas de **neutralidad** térmica que corresponde a temperaturas entre los 18 y los 22°C. En general, la zona podría calificarse como más fresca que cálida. Sin embargo, las condiciones cambiarían drásticamente en los escenarios futuros. En el horizonte lejano, aunque la sensación de **frío** no desaparece

como en algunas otras zonas de la ciudad, se reduce a sólo un 4% de las horas anuales, comparado al 37% del escenario base según el modelo GFDL-CM3.

La sensación de **neutralidad** térmica ocupa casi un 30% aunque desplazada a las horas nocturnas y madrugadas de todas las estaciones del año, con una menor presencia en el invierno. El sitio de S.M. Obispo será no sólo cálido, sino **muy cálido** en las tardes de marzo a octubre, y cálido pesado unas cuantas horas del medio día de los meses de mayo y junio (Fig. 38):

Estación San Martín Obispo, Municipio de Cuautitlán Izcalli, Edo. de Mex.

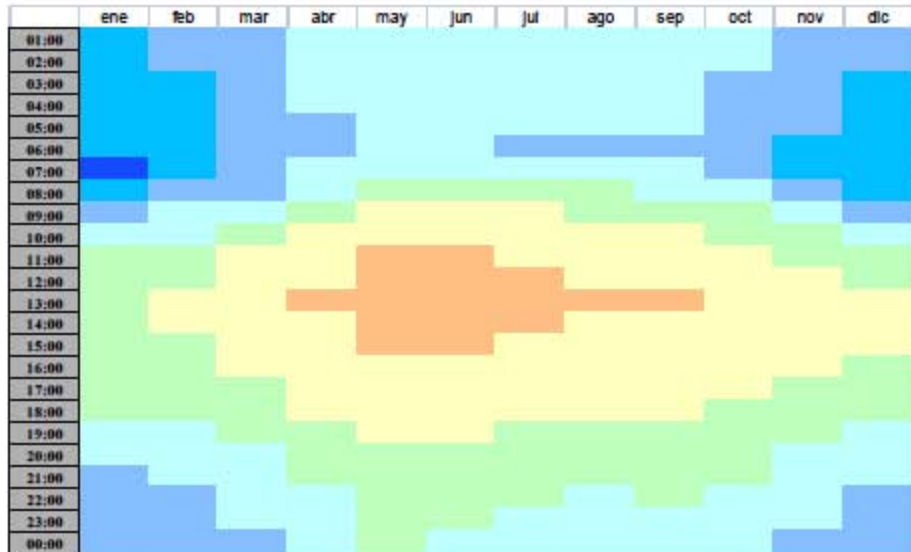
Escenario base (1971-2000)



Estación San Martín Obispo, Municipio de Cuautitlán Izcalli, Edo. de Mex.

Modelo de circulación: MPI-ESM-LR

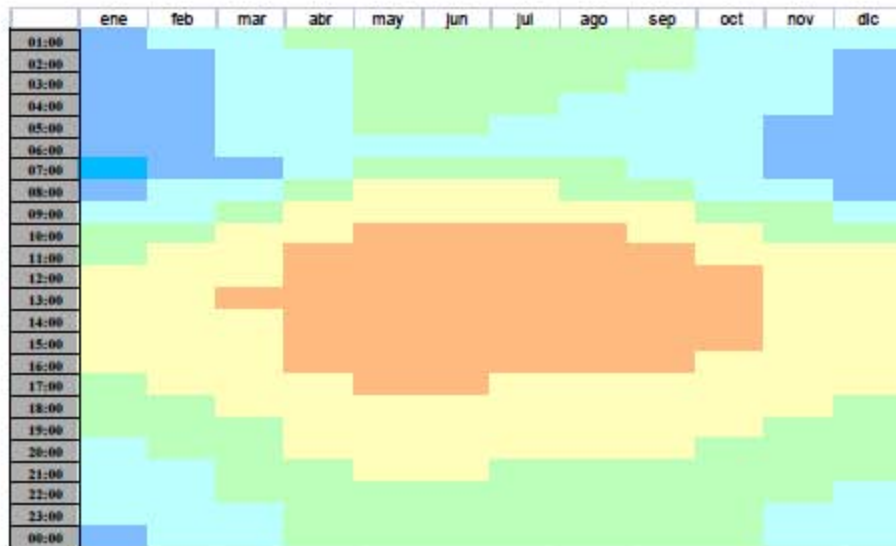
2015-2039 (horizonte cercano)



Estación San Martín Obispo, Municipio de Cuautitlán Izcalli, Edo. de Mex.

Modelo de circulación: MPI-ESM-LR

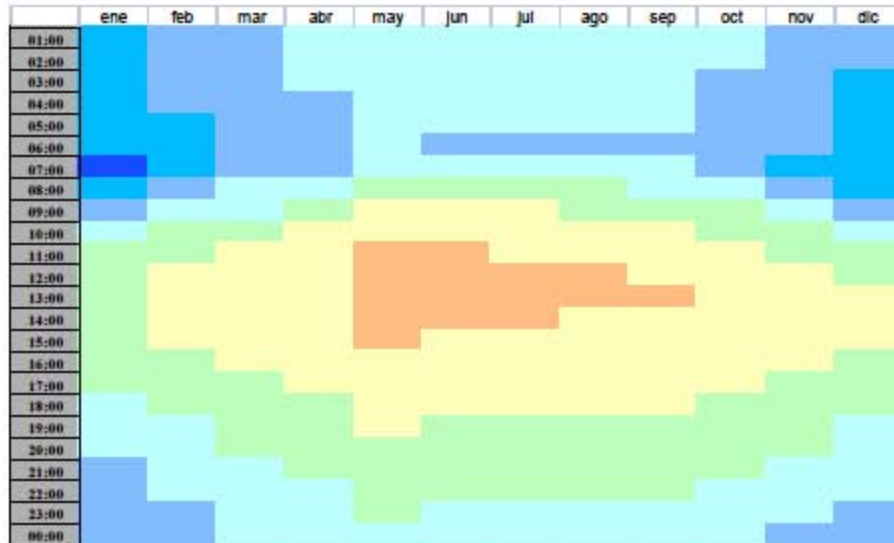
2075-2099 (horizonte lejano)



Estación San Martín Obispo, Municipio de Cuautitlán Izcalli, Edo. de Mex.

Modelo de circulación: GFDL-CM3

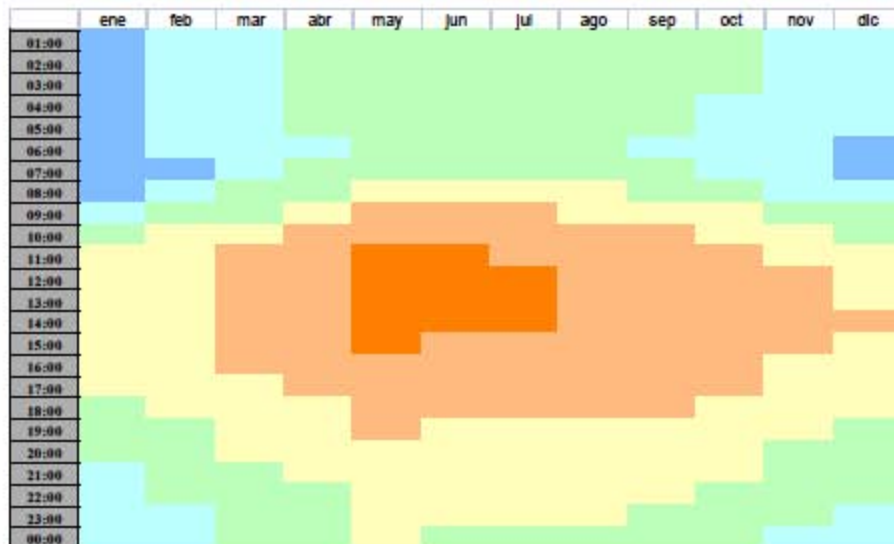
2015-2039 (horizonte cercano)



Estación San Martín Obispo, Municipio de Cuautitlán Izcalli, Edo. de Mex.

Modelo de circulación: GFDL-CM3

2075-2099 (horizonte lejano)



escenarios cercano (2015-2039) y lejano (2075-2099) con un forzamiento radiativo de 8.5 W/m².

Como se puede observar en los climogramas de cada uno de los cuatro sitios, los modelos muestran resultados semejantes entre sí. A la vez, los cuatro no se alejan de algunas conclusiones generales en los escenarios futuros en comparación con el escenario base:

1. El calentamiento urbano es un efecto notorio en las estaciones con ambientes densamente construidos e insertos totalmente en la mancha urbana.
2. Durante el verano, la ZMCM perderá su condición de **fresca y comfortable** para convertirse en **comfortable y más cálida**, como ya habían detectado Tejeda *et al.* (2010).
3. El desplazamiento de las horas **frías** por las de **neutralidad** térmica contribuirá a hacer una urbe más cómoda durante los inviernos.
4. El desplazamiento de las horas **cálidas** durante las estaciones de primavera y verano por las de **muy cálido** o incluso **cálido pesado** harán de la ciudad un sitio sensiblemente más expuesto al agobio y a la pesadez y, posiblemente, a la ocurrencia de enfermedades (en caso de no ser una población debidamente adaptada).
5. Los resultados para las estaciones u observatorios seleccionados pudieran extrapolarse como usos de suelo representativos, climáticamente hablando, al resto de la ciudad (salvo los asentamientos de mayor altitud).

Ante estas expectativas, es posible que se opte cada vez más por la utilización de métodos activos de enfriamiento que conduzcan, ineludiblemente, a un mayor consumo de energía. También habría que tomar en cuenta, si acaso, una compensación entre el menor número de horas frías (y una disminución del consumo de energía para calentar), y el aumento de las condiciones cálidas y la necesidad de enfriar. El deterioro de las condiciones de bienestar térmico no sólo incrementará la demanda de energía en pos de un ambiente comfortable, sino que afectará aun más seriamente la disponibilidad de agua, problema al que la ZMCM se enfrenta desde hace décadas.

Estas proyecciones a futuro son una alerta a los gobiernos y autoridades de cualquier ciudad de cualquier país, sobre todo para aquellas que actualmente enfrentan, con poblaciones mal asentadas y condiciones socioeconómicas precarias, los rigores de un clima que las rebasa. En el caso de este trabajo, para la población en riesgo de una de las ciudades más grandes del mundo.

6. Conclusiones y consideraciones finales

El clima de la Ciudad de México, estudiado anteriormente en sus diversos aspectos, ha sido ahora analizado a partir de puntos de vista nuevos, o bien actualizaciones de resultados previamente publicados. Este trabajo de investigación, habiendo cumplido con los objetivos planteados, realizó aportaciones originales al campo de la climatología urbana al proponer algunas metodologías y al obtener resultados para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México en condiciones actuales y de cara al cambio climático global. Todos los objetivos abarcados tienen como fin último y común denominador a la población.

A lo largo de la investigación:

- Se reconocieron los principales factores climáticos desencadenantes de desastres en el mundo, y en México como país inserto en él.

Resultados: Las precipitaciones extremas y las altas temperaturas son las principales desencadenantes de desastres a nivel mundial, generalmente relacionado a situaciones de vulnerabilidad en países subdesarrollados. El aumento de desastres en las últimas décadas proviene principalmente de las condiciones de pobreza, que conducen a la población a asentarse en sitios inconvenientes e inseguros, y también proviene de una mayor frecuencia de fenómenos atmosféricos extremos. La falta de planeación en el crecimiento de las ciudades y una infraestructura urbana y social inadecuada, comprometen el bienestar de la población, manteniéndola en situación de riesgo ante las amenazas climáticas. Se cuestiona la adaptación de los habitantes de las ciudades a la variabilidad normal del clima como una desventaja a los embates esperados con el cambio climático global.

- Se identificaron los principales hidrometeoros que afectan a la ZMCM a través de la ocurrencia de desastres.

Resultados: Se confirma que, al igual que en el resto del mundo, en la ZMCM las inundaciones son el principal desastre asociado a la presencia de precipitaciones. El análisis de datos de DESINVENTAR y de precipitación diaria revelan que, cuando menos en sitios representativamente diferentes en cuanto a precipitación total anual y número de episodios lluviosos extremos (mayores a 50 mm diarios) los desastres no guardan una relación directa respecto a la severidad del evento. Los desastres suelen presentarse con o sin ocurrencia de episodios extremos tanto en la zona de mayor precipitación (poniente de la ciudad) como en la zona de mayor déficit de agua (oriente de la ciudad). Siguen en número de afectaciones las delegaciones políticas del centro de la ciudad y en los municipios conurbados de mayor densidad poblacional. Se debe hacer notar que la base de datos utilizada recurre a los reportes hemerográficos, los cuales darán un mayor énfasis a las zonas más estratégicas, ya sea por la cantidad de población asentada como por el valor de los bienes afectados.

- Se constató que en cuanto al régimen de temperatura, la ZMCM sufre o goza cada vez con más frecuencia la ocurrencia de días cálidos.

Resultados: Tomando en cuenta lo estipulado por el IPCC donde estadísticamente ocurre un episodio extremo cuando se sobrepasa, en una serie de datos, el percentil 90 o si se encuentra por debajo del percentil 10, tanto los Observatorios de Tacubaya como de Ciudad Universitaria muestran una tendencia positiva. Las temperaturas máximas que sobrepasan ambos sitios llegan incluso hasta más de 80 días por año mayores a 27.9°C (percentil 90 en Tacubaya) y 27.4°C en Ciudad Universitaria. Las temperaturas mínimas también acusan un importante ascenso. Se considera que el aumento en la temperatura mínima responde al efecto urbano de la isla de calor, pero se puede inferir en cuanto a la temperatura máxima, que hay una aportación efecto urbano-cambio climático. En términos de una temperatura fija, como son los 30°C estudiados por el Dr. Ernesto Jáuregui, el número de episodios con tres o más días con temperaturas superiores a ese umbral han sido más del doble (18) en la primera década del siglo XXI que hace 50 años (8) en Tacubaya. En Ciudad Universitaria no ocurrían tales episodios cálidos en los años 60as, mientras que en la primera década del actual siglo han sucedido trece.

- Se propuso, dado que existe una atribución urbana comprobada (isla de calor) en la ZMCM, un método para ponderarla por población y extensión, de manera que no sólo se trabajara la máxima intensidad y se produjera un resultado más acorde a la realidad.

Resultados: La isla de calor ponderada se calculó para el año 2010 a través de la utilización de redes de estaciones climatológicas en la zona metropolitana cuyas series de datos incompletas fueron rellenadas. También se utilizó la información de las Áreas Geoestadísticas Básicas Urbanas (AGEBs), unidad de estudio de INEGI. El dato representativo espacial y temporalmente, se estimó para tres periodos del día (mañana, medio día y noche) para cada mes, obteniéndose un valor ponderado por población que habita cada temperatura (isoterma). Estos resultados se utilizaron posteriormente para la estimación del bioclima, donde fueron agregados junto con las salidas de los modelos de circulación en un horizonte cercano (2015-2039) y en uno lejano (2075-2099) en este efecto combinado urbano-cambio climático global.

- Se realizó un hallazgo de temperaturas umbral, a través de datos de temperatura máxima y mínima del Observatorio de Tacubaya, que signifiquen un cambio en la mortalidad de la población sensible (mayores de 65 años) a enfermedades relacionadas con presencia de frío y calor.

Resultados: Dada la ocurrencia cada vez más frecuente de episodios cálidos, se realizó una búsqueda de las posibles repercusiones en la población sensible (mayores de 65 años) a enfermedades relacionadas con los sistemas circulatorio y respiratorio. Los datos analizados arrojan el resultado de que el cambio hacia una mayor mortalidad (en las enfermedades de los dos tipos), corresponde a la ocurrencia de bajas temperaturas en los cuatro años de características climáticas particulares (El Niño y La Niña intensos y débiles). Aunque los resultados no son concluyentes para las temperaturas máximas debido a la baja frecuencia con que ocurren en los años analizados, en las temperaturas mínimas las variaciones en la mortalidad ocurren más frecuentemente a los 8°C para las enfermedades circulatorias y a los 9°C para las respiratorias. Es posible que otras enfermedades

relacionadas con las temperaturas altas, como las del sistema digestivo, pudieran mostrar un patrón respecto no sólo a la mortalidad sino también a la morbilidad. Queda entonces ampliar el estudio a un análisis más exhaustivo tomando secuencias meteorológicas y no temperaturas aisladas, lo cual podría mostrar resultados que lleven al establecimiento de un umbral y tiempo de permanencia del efecto térmico sobre la población, clasificando, entonces sí, un periodo como ola de calor o de frío.

- Se estimaron las condiciones bioclimáticas con el fin de estimar las sensaciones térmicas indicativas de confort o estrés térmico en la población de la ciudad. Se analizó el escenario base (1971-2000) y los escenarios de cambio climático proyectados para los horizontes cercano (2015-2039) y lejano (2075-2099) con el forzamiento radiativo de mayor impacto: 8.5 W/m^2 de los modelos de circulación seleccionados para México (GFDL, ECHAM y HADLEY).

Resultados: La ZMCM, representada por cuatro tipos de uso de suelo en distintas ubicaciones de la extensa urbe perderá, durante el verano en los escenarios futuros, la condición de fresca y confortable y se tornará en confortable y cálida. Lo que en el escenario base constituía las horas cálidas se volverán muy cálidas y en el horizonte lejano podrán incluso alcanzar el cálido pesado. Es posible que esta condición donde las madrugadas alcancen la neutralidad, las construcciones en su interior no pierdan el calor ganado durante el día, lo que causará estrés o incluso el recrudecimiento de padecimientos en la población vulnerable. Durante los inviernos se gozará de la neutralidad térmica, desplazando a las horas frías. Los cuatro tipos de uso de suelo representativos de la ciudad muestran resultados semejantes. El sitio que sufrirá el menor agobio por calor corresponde a la zona suburbana de planicie (S.M. Obispo, al norte de la ZMCM) siempre y cuando el crecimiento de la ciudad no alcance a conformar la densificación típica de las zonas centrales y del oriente.

Estos resultados no consideran los eventos extremos de temperatura, por lo que sería conveniente realizar un análisis ante la mayor ocurrencia de estos episodios cada vez más frecuentes. Se contempla, como consecuencia, un mayor consumo de agua y de energía eléctrica para enfriar en el horizonte lejano. Es posible que

los resultados de los bioclimogramas puedan extrapolarse a otros sitios de la zona metropolitana, siempre y cuando sean similares en uso de suelo y altitud.

A través de la revisión y el análisis sobre las condiciones climáticas de la ZMCM actuales y de sensaciones térmicas a futuro y su impacto en la población, se observa el efecto negativo asociado al riesgo continuo, producto de la insuficiente planeación y el crecimiento desordenado que se observa, sobre todo, en los asentamientos irregulares. La forma casi caótica en que la ciudad extendió su superficie urbana, las décadas de migración hacia ella y de posterior despoblamiento hacia la periferia y hacia otras ciudades, hacen que el manejo de las políticas públicas de ordenamiento y de mejora ambiental encuentre dificultades. La ciudad, en condiciones climáticas actuales de un régimen térmico benigno y seis meses de precipitaciones, carece de la capacidad de respuesta y de la capacidad de adaptación necesaria para una reducción sustancial de los daños año con año.

La realización de este trabajo, en cuanto a la elaboración de análisis y propuestas metodológicas, ha planteado nuevas interrogantes y la inquietud acerca de los descubrimientos y hallazgos que sólo han marcado un inicio en esta investigación. Existe un campo muy vasto por explorar en cuanto a:

- Una regionalización dentro de la ZMCM donde se relacionen episodios y amenazas climáticas de acuerdo a la vulnerabilidad de la población con fines de la prevención de desastres.
- El hallazgo de umbrales de temperatura para las enfermedades analizadas pero con otros grupos de población.
- El hallazgo de umbrales de temperatura en la ZMCM relacionados a mortalidad y morbilidad de otras enfermedades, como las del sistema digestivo, sobre todo con la tendencia hacia temperaturas más elevadas.
- Evaluaciones bioclimáticas y salud de la población.

Entre otros.

La investigación y el análisis como los presentados en esta tesis podrían ser de interés para quienes realizan propuestas en políticas públicas. El propósito de reducir la

vulnerabilidad ante las amenazas climáticas actuales y también en un futuro a corto y largo plazo a través de planes de acción climática, desembocaría a la larga en un beneficio no sólo al conservar la calidad de vida y la vida del habitante de la ciudad, sino que repercutiría incluso en una mejor disposición de los recursos económicos.

Referencias

- Aguilar, A. G. 1993. La Ciudad de México y las nuevas dimensiones de la reestructuración metropolitana. En: *Espacio Urbano, Cambio Social y Geografía Aplicada*. Luis Felipe Cabrales (compilador). Universidad de Guadalajara, México. Pp. 21-51.
- Aguilar, A.G. 2000. Localización geográfica de la Cuenca de México. En: *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*. G. Garza ed. Gobierno del Distrito Federal, Colegio de México. Pp. 31 a 38.
- Aguilar, A. G. 2006. La ciudad de México y su estructura policéntrica regional. En: *Las grandes aglomeraciones y su periferia regional. Experiencias en Latinoamérica y España*. Coordinador: A. Aguilar. CONACYT, UNAM, Inst. de Geografía, Porrúa Eds. México. Pp.115-141.
- Aguilar, A. G. 2009. Urbanización periférica e impacto ambiental. El suelo de conservación en la Ciudad de México. En: *Periferia Urbana. Deterioro ambiental y reestructuración metropolitana*. Coordinadores: Adrián Guillermo Aguilar e Irma Escamilla. UNAM, Inst. de Geografía, Porrúa Eds. Estudios Urbanos Serie. México. Pp. 21-52.
- Aguilar, A. G. e I. Escamilla. 2009. Introducción. En: *Periferia Urbana. Deterioro ambiental y reestructuración metropolitana*. Coordinadores: Adrián Guillermo Aguilar e Irma Escamilla. UNAM, Inst. de Geografía, Porrúa Eds. Estudios Urbanos Serie. México. Pp. 5-18.
- Ahmad, A. M. Khare, K.K. Chaudhry. 2005. Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections—a review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Vol. 93, Issue 9, Pp. 697–717.
- Alfesio L., F. Braga, A., Zanobetti, J., Schwartz. 2002. The effect of weather on respiratory and cardiovascular deaths in 12 U.S. Cities. *Environ Health Perspect*. Vol. 110 No. 9. Pp. 859–863.
- Aparicio, J., 2005. Guías de riesgo, olas de frío y calor. En línea: <http://www.iaem.es/GuiasRiesgos/Olasfrioycolor.pdf>
- Aquino, M. L. 2012. Impacto de la urbanización sobre la dinámica de las tormentas en el valle de México. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica - Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. 70p.
- ALDF, 2002. Ley de Protección Civil en el Distrito Federal. Asamblea Legislativa del Distrito Federal. Gaceta Oficial de la Federación, México.
- Asimakopoulos, D.N., V.D. Assimakopoulos, N. Chrisomallidou, N. Klitsikas, D. Mangold, P. Michel, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis. 2011. *Energy and climate in the urban built environment*. Editor: M. Santamouris. Science Publishers Ltd. ISBN 978-1-873936-90-0.

- Auliciems, A. and R. de Dear. 1986. Air- conditioning in Australia: Human thermal factors. *Architectural Science Review*. Vol. 29, pp. 67-75.
- Auliciems, A. and S. Szokolay. 1997. Thermal Comfort. Notes of *Passive and Low Energy Architecture International*. No. 3. Brisbane: PLEA - University of Queensland.
- Ayala, F. y J. Olcina. 2002. Capítulo 1. Riesgos Naturales. Conceptos fundamentales y clasificación. *Riesgos Naturales*. F. Ed. Ariel Ciencia. Pp. 41-73.
- Bárcena, A. y H. Tiessen. 2013. Prólogo en: *Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina*. Naciones Unidas, CEPAL, IAI.
- Barradas, V., A. Tejada, E. Jáuregui. 1999. Energy balance measurements in a suburban vegetated area in Mexico City. *Atmospheric Environment*. No.33. Pp. 4109-4113.
- Basu, R. 2009. High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. BioMed Central (<http://www.ehjournal.net/content/8/1/40>).
- Bataillon, C. y A.G. Aceves. 1968. *Las zonas suburbanas de la ciudad de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bataillon, C. 2008. Corona urbana alrededor de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. En: *La urbanización difusa de la Ciudad de México*. Coordinador: Javier Delgado. Instituto de Geografía, UNAM. México. Pp. 23-42.
- Bell, M.L., M. O'Neill, N. Ranjit, V. H. Borja-Aburto, L. A. Cifuentes, N. C. Gouveia. 2008. Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: a case-crossover study in Sao Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico. *International Journal of Epidemiology*. No.37, pp. 796-804.
- Blazejczyk, K., Y. Epstein, G. Jendritzky, H. Staiger, B. Tinz. 2012. Comparison of UTCI to selected thermal indices. *Int J Biometeorol*. No. 56 pp. 515–535 DOI 10.1007/s00484-011-0453-2.
- Bornstein, R. and Q. Lin, 2000: Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. *Atmos. Environ.*, No. 34 pp. 507–516.
- Calderón-Córdova, F.
http://www.diversidadambiental.org/articulos/tierracenzontle.html#_ftn1
- Cámara, E. 2006. *Variables meteorológicas y salud*. Servicio de Sanidad Ambiental. Documentos de Sanidad Ambiental. Comunidad de Madrid, España. 122p.
- Campos, M., A. Toscana., J. Montoy y P. Fuerte. 2007. Exclusión socio – territorial y riesgo: estudio de caso en las laderas altas de la Sierra de Guadalupe, Estado de México. *Revista Actas Latinoamericanas de Varsovia* No. 30, 2007., pp. 133- 150.
- Capel, J.J. y J.M. Castillo. 2000. Clima y Geografía. En: Homenaje de la Universidad Complutense. *Lecturas Geográficas*, Homenaje a José Estébanez Álvarez. Vol. I.

Cardós, C., E. Barrera y R. Sanz. 2006. Un estudio sobre episodios de temperaturas extremas en Canarias. Ministerio de Medio Ambiente. Calendario Meteorológico 2007. Madrid, España. 307pp. Vol. 1: 239-248. ISBN: 9788483203644

CARE

http://www.careclimatechange.org/files/reports/Implications_flood_risk_world_3.jpg

Cervantes, J. y G. Alfaro, 2000. 1.3 Características de los suelos. *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*. Coord. G. Garza. El Colegio de México, Gobierno del Distrito Federal. Pp. 47-53.

CNN, 2015. <http://mexico.cnn.com/fotogalerias/2015/03/11/una-tromba-provoca-caida-de-arboles-y-espectaculares-al-noroeste-del-df>

CONAGUA, 2012. Libro Blanco CONAGUA-07. Programa Parque Ecológico Lago de Texcoco PELT:
[http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/Documentos/LIBROS%20BLANCOS/CONAGUA-07%20Programa%20Parque%20Ecol%C3%B3gico%20Lago%20de%20Texcoco%20\(PELT\).pdf](http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/Documentos/LIBROS%20BLANCOS/CONAGUA-07%20Programa%20Parque%20Ecol%C3%B3gico%20Lago%20de%20Texcoco%20(PELT).pdf)

CONAPO, SEDESOL, INEGI. 2005. Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005.
http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/delimex05/DZMM_2005_0.pdf

CONAPO. 2006. Proyecciones de la población de México 2005–2050. Consejo Nacional de Población - CONAPO, México.

CONAPO, 2010a.

http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Delimitacion_de_las_zonas_metropolitanas_de_Mexico_2010_-_Analisis_de_resultados

CONAPO, 2010b.

http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/indices_margina/marginacion_urbana/AnexoA/Mapas/01_Zona_Metropolitana_del_Valle_de_Mexico.pdf

CONEVAL

http://www.coneval.gob.mx/Informes/Pobreza/Pobreza%20urbana/Pobreza_urbana_y_de_las_zonas_metropolitanas_en_Mexico.pdf

Conde, C., O. Sanchez, V. Magaña, C. Gay.1995. Escenarios climáticos básicos y regionales, Segundo taller de Estudio de País: México. México ante el Cambio Climático. Memorias, 101-111.

Conde, C., O. Sánchez, C. Gay. 1994. Escenarios básicos y regionales. Estudio de País. México. México ante el cambio climático. En Memorias del Primer Taller de Estudio de País. México. México ante el cambio climático. Pp. 39-44. INE, US.

Country Studies Program Support for Climate Change Studies, UNAM, 18 al 22 de abril de 1994. Cuernavaca, Morelos, México.

Conde, C., F. Estrada, B. Martínez, O. Sánchez, C. Gay. 2011. Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera* 24 (1), 125-140.

Conde, C., D. Pabón, R. Sánchez-Rodríguez. 2013. II. La importancia de la información climática para la planificación del crecimiento y el desarrollo urbano. *Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina*. Naciones Unidas, CEPAL, IAI.

Delgado, J., C. Galindo, M. Ricárdez. 2008. La difusión de la urbanización o cómo superar la dicotomía rural-urbana. En: *La urbanización difusa de la Ciudad de México*. Coordinador: Javier Delgado. Instituto de Geografía, UNAM.

Delgado, J., 2003. La urbanización difusa, arquetipo territorial de la ciudad-región. *Sociológica*, año 18, número 51, pp. 13-48.

de Sherbinin, A., A. Schiller, A. Pulsipher. 2007. The vulnerability of global cities to climate hazards. *Environment and Urbanization*.19: 39.

DESINVENTAR. <http://www.desinventar.org/>.

Díaz, J., R. García, F. Velázquez de Castro, E. Hernández, C. López, A. Otero. Effects of extremely hot days on people older than 65 years in Seville (Spain) from 1986 to 1997. *Int J Biometeorol* 2002;46:145–49

Díaz-Lázaro, M. 2011. Ondas de calor en seis zonas urbanas del estado de Veracruz. Tesis de licenciatura en Ciencias Atmosféricas. Universidad Veracruzana. Agosto 2011.

Dirmeyer, P, D. Niyogi, N. de Noblet-Ducoudré, R. E. Dickinson, P. Snyder. 2010. Impacts of land use change on climate. *International Journal of Climatology*, Special Issue: Impacts of land use change on climate. Volume 30, Issue 13, pages 1905–1907.

El Universal, 2010. <http://archivo.eluniversal.com.mx/notas/666770.html>

Eliasson, I., B. Offerle, C.S.B. Grimmond, S. Lindqvist. 2006. Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon. *Atmospheric Environment*. Vol. 40, No.1, Pp. 1–16.

Estrada F., A. Martínez-Arroyo, A. Fernández-Eguiarte, E. Luyando and C. Gay, 2009. Defining climate zones in México City using multivariate analysis. *Atmosfera*, 22(2), 175-193.

Espinoza, E. 1991. *Ciudad de México. Compendio Cronológico de su Desarrollo Urbano. 1521-1980*. 265 pp.

Excelsior, 2015a. <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2015/07/24/1036542>

Excelsior, 2015b. <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2015/03/11/1012849>

- Excelsior, 2015c. <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2015/05/27/1026359>
- Ezcurra, E. J. Sarukhan. 1990. Costos ecológicos del mantenimiento y del crecimiento de la ciudad de México. En: Kumate, J. y Mazari, M. *Problemas de la Cuenca de México*. México, El Colegio Nacional.
- Ezcurra, E. 2003. *De las chinampas a la megalópolis. El medio ambiente en la cuenca de México*. La ciencia para todos. 91. FCE.
- Fanger, P.O. 1970. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. McGrawHill. ISBN:0-07-019915-9
- Fernández, F. y D. Rasilla. 2009. Urban enhancement of the heat waves in Madrid and its metropolitan area. *Geophysical Research Abstracts*. Vol 11 EGU2009-6123, 2009.
- Garza, G. 2000. Introducción. *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*. El Colegio de México, Gobierno del Distrito Federal. Pp 3-27.
- Gill, R. 2008. *Las grandes sequías mayas. Agua, vida y muerte*. FCE.
- Glantz, M.H. 1998. *Corrientes de Cambio: El Impacto de "El Niño" sobre el Clima y la Sociedad*, traducción y adaptación de Rodrigo H. Núñez, Cambridge University Press/Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Valparaíso.
- González, D. 2008. Un modelo integral para la valoración del riesgo de inundación en centros urbanos y/o suburbanos -*Enfoque metodológico utilizando indicadores*- Caso: Pueblo Viejo, Veracruz, México. Tesis doctoral. Instituto de Investigación en Ingeniería, Facultad de Ingeniería "Arturo Narro Siller"- UAT, Centro Universitario Tampico – Madero.
- González de León, T. 2007. La ciudad contradictoria. Entrevista , en *Letras Libres*, enero de 2007 por Cayuela Gally, Ricardo <http://www.letraslibres.com/revista/convivio/la-ciudad-contradictoria-entrevista-con-teodoro-gonzalez-de-leon> (consultada el 2 de mayo de 2009.)
- Gosling, S., G.R. McGregor, A. Páldy. 2007. Climate change and heat-related mortality in six cities Part 1: model construction and validation. *Int. J. Biometeorol* 51:525-540.
- Grimmond, C.S.B, C. Souch 1994: Surface description for urban climate studies: a GIS based methodology. *Geocarto International*, 9, 47-59.
- Grimmond, C.S.B. 2006. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. *Theor. Appl. Climatol*. Springer-Verlag. 84, 3–22
- Gutiérrez, T., J. González. 2007. Distribución de la población (SII) *Nuevo Atlas Nacional de México*. UNAM, Instituto de Geografía.

- Hidore, J. 1996. *Global Environmental Change*. Its nature and impact. Prentice Hall College. 263 pp.
- Höppe, P., 1999. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int J Biometeorol* 43, 71–75
- Howard, 1833. *The Climate of London*. The Climate of London. IAUC 2007 edition available at www.lulu.com in two volumes.
- IFRC, 2013. Informe mundial sobre desastres: Resumen: Tecnologías y futuro de la intervención humanitaria. <http://www.ifrc.org/publications-and-reports/world-disasters-report/world-disasters-report-2013/>
- IG, 2007. *Nuevo Atlas Nacional de México*. Instituto de Geografía, UNAM.
- INECC, 2012. Capítulo 2. Vulnerabilidad y riesgos climáticos: Elementos clave para la adaptación. *Adaptación al Cambio Climático en México: Visión, elementos y criterios para la toma de decisiones*. SEMARNAT, INECC, Gobierno Federal.
- INEGI, 2005. Censo Nacional de Población y Vivienda 2005. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2005/>
- [INEGI](#), [CONAPO](#), [SEDESOL](#) (2010). [Instituto Nacional de Estadística y Geografía](#) (ed.): «[Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010](#)» (PDF).
- IPCC, 2007. Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, RK y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 pp.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014. Chapter 8. Urban Areas. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Working II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.
- Jáuregui, O. E., 1959. Notas sobre la precipitación en Tacubaya para el período 1900-1958. *Ing. Hidr. en México*. Vol. XIII(4); 29-39, México.
- Jáuregui, O. E., 1960. Las tolvaneras de la Ciudad de México. *Ing. Hidr. en México*, Vol. XIV(2); 1-7, México.
- Jáuregui, O. E., 1963. El clima del Valle de México. Climatología Tomo II. *Comisión de Aguas de la Cuenca del Valle de México*, marzo, México.
- Jáuregui, O. E., 1965. Mesoclima y bioclima del Valle de México, *Publicaciones del Instituto de Geografía-UNAM*, Vol. 1, 99-123, México.

- Jáuregui E., 1971a. La erosión eólica en los suelos vecinos al lago de Texcoco, *Ing. Hidr. en México*, Vol. XXV(2), 103-118, México.
- Jáuregui, O. E., 1971b. Mesomicroclima de la Ciudad de México, *Dir. Gral. de Publs.-UNAM*, Primera Ed., México
- Jáuregui, E., 1973. The urban climate of Mexico City. *Erdkunde*, Vol. XXVII(4), 298-307, Bonn, Alemania.
- Jáuregui, O. E., 1974. La isla de lluvia de la Ciudad de México. *Recursos Hidr.* Vol. III(2), 138-151, México.
- Jáuregui, E., 1987. Urban heat island development in medium and large urban areas in Mexico. *Erkunde*, 41, 48-51, México.
- Jáuregui, E., 1989. The dust storms of Mexico City. *Int. Jour. Of Climat.*, vol. 9, 169-180. London, England.
- Jáuregui, E. 1991. Influence of a Large Urban Park on Temperature and Convective Precipitation in a Tropical City. *Energy and Buildings*, 15-16, 457-463.
- Jáuregui, E. y E. Luyando, 1992. Patrones de flujo del aire superficial y su relación con el transporte de contaminantes en el Valle de México. *Boletín del Instituto de Geografía-UNAM*, No. 24, 51-78. México.
- Jáuregui, E. 1993. La isla de calor urbano de la Ciudad de México a fines del siglo XIX, *Boletín del Instituto de Geografía-UNAM*, 26, 31-39, México. ISSN-199-4611.
- Jáuregui, E. J. Cervantes and A. Tejeda, 1996. Bioclimatic conditions in Mexico City-an assessment. *Int. Jour. of Biomet.*, 40, 166-177.
- Jauregui, E., and E. Romales, 1996: Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmos. Environ.*, 30, 3383–3389.
- Jáuregui, E., 1997. Heat island development in Mexico City, *Atmosph. Env.* 31, 22, 3821-3831. Elsevier Science.
- Jáuregui, E. and A. Tejeda, 1997. Urban–rural humidity contrasts in Mexico City, *Int. Jour. of Climat.*, 17, 187-196.
- Jáuregui, E. and E.Luyando, 1998. Long-term association between pan evaporation and the urban heat island in Mexico City. *Atmósfera*, 11, 1, 45-60, México.
- Jáuregui, E., y E. Luyando, 1999. Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City. *Int. Jour. of Clim.* 19:683-694.
- Jáuregui, E. 2000. *El clima de la Ciudad de México*. Textos monográficos. Ed. Plaza y Valdés. 133 pp.

- Jáuregui, E. and A. Tejeda. 2001. A scenario of bioclimatic conditions in Mexico City for CO₂ doubling. *Atmósfera*, Vol. 14, 3, 125-138.
- Jauregui, E. y A. Tejeda. 2004. Urban climate research in México. IAUC Newsletter, International Association for Urban Climate, Abril, Vol. 4.
- Jáuregui, E. 2009. The heat spells of Mexico City. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. ISSN 0188-4611, Núm. 70, 2009, pp. 71-76
- Jazcilevich, A., E. Jáuregui, E. Luna. 2000. Simulated urban climate response to historical land use modification in the basin of Mexico. *Climatic Change*, 44, 515-536. Kluwer Academic Publishers, Holanda.
- Jazcilevich, A., A. R. García, E. Caetano. 2005. Locally induced surface air confluence by complex terrain and its effects on air pollution in the Valley of Mexico, *Atmospheric Environment*, Junio, 2005. Pp.
- Jazcilevich, A., A. R. García, L. G. Ruiz-Suárez. 2003. *A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of México*. *Atmospheric Environment*, 37, pp. 183-193, 2003.
- Kalkstein, L. S., K. M. Valimont. 1987. Climate effects on human health. In: *Potential effects of future climate changes on forests and vegetation, agriculture, water resources, and human health*. EPA Science and Advisory Committee Monograph no. 25389, 122-52. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
- Katayama, K., and M. Momiyama-Sakamoto. 1970. A biometeorological study of mortality from stroke and heart diseases: Its geographical differences in the United States. *Meteorology and Geophysics*, 21, 127-139.
- Klaus, D. E. Jáuregui, A. Poth, G. Stein, M. Voss, 1999. Regular circulation structures in the tropical basin of Mexico City as a consequence of the urban heat island effect. *Erkunde*. Begründet von Carl Troll. 231-243.
- Kondo, H., T. Tokairin, Y. Kikegawa. 2008. Calculation of wind in a Tokyo urban area with a mesoscale model including a multi-layer urban canopy model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 4th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2006) Vol. 96, Issues 10–11. Pp. 1655–1666.
- Kovats, S. y R. Akhtar. 2009. Climate, climate change and human health in Asian cities. *Environment and urbanization*. 20, 165.
- Kumar, P., P. Fennell, R. Britter. 2008. Effect of wind direction and speed on the dispersion of nucleation and accumulation mode particles in an urban street canyon. *Science of The Total Environment*. Vol. 402, No. 1, Pp. 82–94.
- Kumate, J., M. Mazari. (Coordinadores). 1990. *Problemas de la Cuenca de México*. El Colegio Nacional.

- La Jornada, 2007. Podría haber inundaciones, pero no un desastre: expertos. A. Enciso. 13 de julio 2007. <http://www.jornada.unam.mx/2007/07/13/index.php?section=politica&article=005n2pol>
- La Razón, 2012. <http://razon.com.mx/spip.php?article127753>
- Llanas, R. 1997. Uso del suelo urbano. 1521-1821, en *El Centro Histórico, Ayer, hoy y mañana*. INAH, DDF.
- Lombardo, S. 1972. Desarrollo urbano de México Tenochtitlán. *Historia Mexicana* 22, No. 2. Pp.121-141.
- Lombardo, S. 2000. Evolución de México-Tenochtitlán. 2. Origen y Evolución de la ciudad de México: Siglos XVI, XVII, XVIII y XIX. *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*. El Colegio de México, Gobierno del Distrito Federal. Pp 93-100.
- Lopes, A., S. Oliveira, M. Fragoso, J.A. Andrade. 2009. Wind risk assessment in urban environments: the case of falling trees during windstorm events in Lisbon. *Bioclimatology and Natural Hazards*. Springer Netherlands. Pp. 55-74.
- Lopes, A., J. Sarajva, M.J. Alcoforado. 2011. Urban boundary layer wind speed reduction in summer due to urban growth and environmental consequences in Lisbon. *Environmental Modelling & Software*. Vol. 26, No. 2. Pp. 241–243.
- López-Blanco, J. y M.L. Rodríguez-Gamiño. 2009. Determinación de indicadores ambientales de la ZMVM. En: *Periferia Urbana. Deterioro ambiental y reestructuración metropolitana*. Coordinadores: Adrián Guillermo Aguilar e Irma Escamilla. UNAM, Inst. de Geografía, Porrúa Eds. Estudios Urbanos Serie. México. Pp. 223-249.
- López-Díaz, F. 2014. Análisis regional de eventos extremos de temperatura en México y sus posibles variaciones en el contexto de cambio climático. Tesis de doctorado, Posgrado en Ciencias de la Tierra. UNAM.
- López-Díaz, F., O. Sánchez, C. Conde. 2014. Capítulo III. Análisis de Tendencias y Eventos Climáticos Extremos. *Historia del Clima de la Ciudad de México*. CVCC, Gob. Cd. De México, UNAM, SECITI, CCA.
- López-Peláez, J. y Pigeon, P. (2011). Co-evolution between structural mitigation measures and urbanization in France and Colombia: A comparative analysis of disaster risk management policies based on disaster databases. [En línea]. Francia, disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019739751100021X> [Accesado el día 27 de junio de 2012].
- López, F. 2009. Urbanización en la periferia sur del Distrito Federal. Cobertura de agua en la delegación Tláhuac. En: *Periferia Urbana. Deterioro ambiental y reestructuración metropolitana*. Coordinadores: Adrián Guillermo Aguilar e Irma Escamilla. UNAM, Inst. de Geografía, Porrúa Eds. Estudios Urbanos Serie.
- Lugo, J., M. Inbar. 2002. *Desastres naturales en América Latina*. FCE.

- Luyando, E. 2004. Balance energético atmosférico para la Ciudad de México y para Barcelona (España). Tesis de maestría en Geografía. Fac. de Filosofía y Letras.
- Luyando, E. y A. Tejeda. 2010. Escenarios de bioclima humano en la megalópolis del centro de México ante cambio climático. *Clima, Ciudad y Ecosistemas*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC), F. Fernández, E. Galán, R. Cañada Eds. Serie A. No. 7.
- Luyando, E., Cortés A., Fuerte M. P. 2014. Distribución de los desastres asociados por lluvias en la Ciudad de México: Una ventana para pensar en la gestión del riesgo desde el ordenamiento territorial. En: Ma. Teresa Ayllón Trujillo (Ed.) *Conflictos de poder sobre el espacio. Historia, naturaleza y gestión. Manual de ordenación territorial a diferentes escalas*. Tomo II. México, Conacyt-UASLP, Ed. Eumed.net., ISBN: 978-1-60692-231-6.
- Magaña, V. M. 1995. Escenarios físicos de cambio climático, Memorias del Segundo Taller de "Estudio de País: México". México ante el Cambio Climático, Cuernavaca, Morelos, 8-11 de mayo de 1995, México, pp. 98-100.
- Magaña, V., T. Morales, J. L. Pérez y S. Orozco. 1998. El Niño y La Niña en el estado de Tlaxcala. Fundación Produce, A.C., SEMARNAP y CONACYT. Tríptico
- Magaña, V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrisoza y J. Pérez. 1999. El Niño y el clima, en: *Los impactos de El Niño en México*, V. Magaña O., ed., págs. 23-66. http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/el_nino/cap2.pdf
- Magaña, V., J. Pérez-Fernández, M. Méndez-Pérez. 2003. Diagnosis and prognosis of extreme precipitation events in the Mexico City Basin. *Geofis. Intern.*, 41, 247-259.
- Martin-Vide, J. 2009. Conceptos previos y conceptos nuevos en el estudio del cambio climático reciente. *Investigaciones Geográficas*, N° 49, pp. 51-63. ISSN: 0213-4691 Instituto Universitario de Geografía, Universidad de Alicante.
- Martínez, A., E. Jáuregui. 2000. On the environmental role of urban lakes in Mexico City. *Urban Ecosystems*, 4, 145-166.
- Martínez, B. 2011. Reporte final de la primera etapa del proyecto: Patrones de precipitación en el Valle de México, su evolución histórica y sus proyecciones. CVCCCM. <http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/viewentry.php?id=20>.
- Masterton, J. M. y F. A. Richardson. 1979. Humidex: A Method of Quantifying Human Discomfort due to Excessive Heat and Humidity, Environment Canada, Atmospheric Environment Service, Ontario, Canada.
- Mauleón de, H. 2015. El día que la Ciudad de México desapareció. *Revista Nexos*. Abril.
- Macpherson, R. K. 1962. The assessment of the thermal environment: a review. *Brit J Ind Med*. 19:151-164.

- McCarthy, M.P. y M.G. Sanderson. 2011. Urban Heat Islands: Sensitivity of Urban Temperatures to Climate Change and Heat Release in Four European Cities. In: *Cities and Climate Change. Responding to an Urgent Agenda*. Ed. D. Hoorweg, M. Freire, M. Lee, P. Bhada-Tata, B. Yuen. The World Bank.
- McMichael, A.J, P. Wilkinson, R.S Kovats, S. Pattenden, S. Hajat, B. Armstrong, N. Vajanapoom, E. M. Niciu, H. Mahomed, C. Kingkeow, M. Kosnik, M.S. O'Neill, I. Romieu, M. Ramírez-Aguilar, M. L. Barrego, N. Gouveia, B. Nikiforov. 2008. International study of temperature, heat and urban mortality: the "ISOTHURM" project. *International Journal of Epidemiology*. 37:1121-1131.
- Melo, C. y G. Alfaro. 2000. 1.5 Vegetación. *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*. Coord. G. Garza. El Colegio de México, Gobierno del Distrito Federal. Pp.61-67.
- Méndez, I. 2004. Consideraciones bioclimáticas para el establecimiento de las tarifas eléctricas domésticas en los estados de Tabasco, Veracruz y Tamaulipas. Tesis de maestría, Posgrado en Geografía, UNAM.
- Mertins, G. 2011. Las metrópolis latinoamericanas: Vulnerabilidad, informalidad y gobernabilidad. En: *Vulnerabilidad en grandes ciudades en América Latina*. Editor: Ricardo a. Vergara. Univ. del Norte. Colombia.
- Meze-Hausken, E. 2008. On the (im-)possibilities of defining human climate thresholds. *Climatic Change*, 89:299-324.
- Missenard, A.1937. *L'Homme et le climat*, Eyrolles, París.
- Milenio, 2014. http://www.milenio.com/df/drenaje_danado_DF-Sistema_de_Aguas-SACM_0_339566061.html
- Morales, P. 2008. *Estadística aplicada a las Ciencias Sociales*. Madrid. Universidad Pontificia Comillas.
- Moran, D. and Y. Epstein. 2006. Evaluation of the Environmental Stress Index (ESI) for hot/dry and hot/wet climates. *Industrial Health*. 44, 399-403.
- Mooser, F. 2000 1.2 Estructura geológica. *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*. Coord. G. Garza. El Colegio de México, Gobierno del Distrito Federal. Pp. 39-45.
- Moussiopoulos, N., P. Sahm, V. Fuentes, A. Jazcilevich, A. Wellens, 1994. Simulation of the Wind Flow in the Valley of Mexico with the EUMAC Zooming Model. International Scientific Secretariat, Garmisch-Partenkirchen, Marzo 1994.
- Niyogi, D., R. Mahmood, J. O. Adegoke. 2009. Land-Use/Land-Cover Change and Its Impacts on Weather and Climate. *Boundary-Layer Meteorol*. 133:297–298 DOI 10.1007/s10546-009-9437-8.
- OECD, 2010. *Cities and Climate Change*, Chapter 2. Climate Change Impacts Specific to Urban Regions. OECD Publishing. 276 pp.

- Oke, T. 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, Vol. 7 No. 8. Pp. 769-779.
- Oke, T. 1987a. *Boundary layer climates*. Methuen Ed. New York, 435 p.
- Oke, T. 1987b. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*. 11, 103-133.
- Oke, T., E. Jáuregui. 1992. Surface energy balance in Mexico City. *Atmospheric Environment*. 26, 433-444.
- Oke, T. 1997. Urban climates and global change. In: Perry, A.; Thompson, R. (eds.), *Applied Climatology: Principles and Practice*. London Routledge: 273-287.
- Oke, T. 2006. Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Theor. Appl. Climatol.* 84, 179–190.
- Oke, T., A. Spronken-Smith, E. Jáuregui, C.S.B. Grimmond. 1999. The energy balance of central Mexico city during the dry season. *Atmos. Environ*, 33, 3919-3930.
- O'Neill, M., S. Hajat, A. Zanobetti, M. Ramírez-Aguilar, J. Schwartz. 2005. Impact of control for air pollution and respiratory epidemics on the estimated associations of temperature and daily mortality. *International Journal of Biometeorology*. 50:121-129.
- ONU, 2013. http://www.un.org/spanish/News/story.asp?newsID=26703#VUEx_I_Oko
- ONU-HABITAT. 2011. Las ciudades y el cambio climático: Orientaciones para políticas Informe mundial sobre asentamientos humanos 2011. Resumen Ejecutivo.
- Oxfam, 2007. *De alerta Climatológica a alarma Climática*, Informe de Oxfam Internacional.
- PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. 2014. Trends in global CO2 emissions: 2014 Report. http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/jrc-2014-trends-in-global-co2-emissions-2014-report-93171.pdf
- Peralta, A.R. 2001. Efecto de El Niño Southern Oscillation (ENSO) en precipitación pluvial en México Central. *Investigación y Ciencia*. Universidad autónoma de Aguascalientes <http://www.uaa.mx/investigacion/revista/archivo/revista24/Articulo%201.pdf> enero-junio 2001. No. 24. pp 2-15.
- Pradilla, E. 2005. Zona Metropolitana del valle de México: megaciudad sin proyecto. *Ciudades*. 9, pp 83-104.
- RAE, 2015. <http://lema.rae.es/drae/?val=susceptible>
- Renou, E. 1862. Difference de temperature entre Paris el Choisi-le Roi, Soc. Meteor de France. *Annuaire*. 10, 105-109.

- Renou, E. 1868. Différences de température entre la ville et la champagne. *Annuaire Soc. Met. France*, pp 83-97.
- Rose, G. 1966. Cold weather and ischaemic heart disease. *Brit. J. Prev. soc. Med.* 20, 97-100.
- Ruth, M., A. Baklanov. 2012. Urban climate science, planning, policy and investment challenges. *Urban Climate*. Volume 1, pp. 1-3.
- Sakka, A., M. Santamouris, I. Livada, F. Nicol, M. Wilson. 2012. On the thermal performance of low income housing during heat waves. *Energy and Buildings*. Vol. 49, pp. 69-77.
- Sánchez-Rodríguez, R. 2013a. Vulnerabilidad al cambio climático. *Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina*. Naciones Unidas, CEPAL, IAI.
- Sánchez-Rodríguez, R. 2013b. El cambio climático y las áreas urbanas de América Latina: a manera de introducción. *Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina*. Naciones Unidas, CEPAL, IAI.
- Santos, C., I. Escamilla, L. Guarneros. 2009. La expansión urbana en la zona norte de la periferia metropolitana de la Ciudad de México. En: *Periferia Urbana. Deterioro ambiental y reestructuración metropolitana*. Coordinadores: Adrián Guillermo Aguilar e Irma Escamilla. UNAM, Inst. de Geografía, Porrúa Eds. Estudios Urbanos Serie.
- Satterthwaite, D. S. Huq,, H. Reid, M. Pelling and P. Romero Lankao. 2009. PART 1 INTRODUCTION. 1 Adapting to Climate Change in Urban Areas: The Possibilities and Constraints in Low- and Middle-Income Nations. En: *Adapting Cities to Climate Change Understanding and Addressing the Development Challenges*. Pp. 3-34.
- Selover, N., 1997: Precipitation patterns around an urban desert environment—topographic or urban influences? *Association of American Geographers Annual Meeting Abstracts*, Fort Worth, TX, AAG.
- Sobrino, L.J. 2008. Diversidad y especialización económica en el subsistema de ciudades de la Región Centro. *La urbanización difusa de la Ciudad de México. Otras miradas sobre un espacio antiguo*. Coordinador: Javier Delgado. Instituto de Geografía UNAM.
- Solís, L. y E. Espinosa. 1990. Dimensiones económicas de la concentración capitalina. Plática 7. En: *Problemas de la Cuenca de México*. El Colegio Nacional. Kumate, J., M. Mazari.(coordinadores).
- Sozzi, R., A. Salcido, R. Saldaña, T. Georgiadis, 1999. Daytime radiation parametrisation for Mexico City suburban áreas. *Atmos. Res.*, 50, 53-68.

- Srivanit, M. 2013. <http://www.slideshare.net/manat-srivanit/quantifying-the-stability-of-summer-temperatures-for-different-thermal-climate-zones-an-application-to-the-bangkok-metropolitan-area>
- Steadman, R.G. 1979. The assessment of sultriness: Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *J. Appl. Meteor.*, 18, pp. 874-884.
- Stewart, I., T. Oke. 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 1879–1900.
- Tejeda, A., J. M. Maruri, A. Martínez. 1991. Three statistical models for simulation of the mean monthly wet bulb air temperatura in Mexico. *Atmósfera*, Vol. 4 No. 4.
- Tejeda, 1996. Sobre mediciones y parametrizaciones del balance energético y la estabilidad atmosférica en la Ciudad de México. Tesis Doctoral. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Tejeda, A., D. Rivas. 2001. Un escenario de bioclima humano en ciudades del sur de México, bajo condiciones de 2CO₂ atmosférico, en *El tiempo del clima* (A.J. Pérez-Cueva, E. López-Baeza y J. Tamayo-Carmona, editores). Asociación Española de Climatología Serie A, No. 2, 574 p: 551-562.
- Tejeda, A. y Jáuregui, E. 2005. Surface energy balance measurements in the Mexico City region: a review. *Atmósfera*, 18 (2), 1-23.
- Tejeda, A., C. Conde, I. Valencia-Treviso. 2008, Climate change scenarios of extreme temperatures and atmospheric humidity for Mexico, *Atmósfera*, Vol. 21, pp. 367 – 372.
- Tejeda, A. E. Luyando, G., E. Jáuregui. 2011. Condiciones medias de estrés térmico en megaciudades mexicanas ante cambio climático. *Atmósfera*, Vol. 24 No. 1. pp. 15.
- [The Canada Institute of the Woodrow](#), [Simone Pulver](#) (Lead Author); [Kristen Hite](#) (Topic Editor) "Climate politics in Mexico in a North American perspective". In: *Encyclopedia of Earth*. Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment). [First published in the *Encyclopedia of Earth* February 11, 2007; Last revised Date February 11, 2007; Retrieved January 9, 2011 <[http://www.eoearth.org/article/Climate politics in Mexico in a North American perspective](http://www.eoearth.org/article/Climate%20politics%20in%20Mexico%20in%20a%20North%20American%20perspective)>
- Thielen, J.,W.Wobrock, A. Gadian, P. G. Mestayer, and J.-D. Creutin. 2000: The possible influence of urban surfaces on rainfall development: A sensitivity study in 2D in the meso-gamma scale. *Atmos. Res.*, **54**, 15–39.
- Toscana, A., M. Campos, y F. Monroy. 2008. Inundaciones, protección civil y habitantes de San Matea Atenco, Estado de México. *Revista de Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM. Pp. 68-81.

- UN, 2014. <http://www.un.org/es/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects-2014.html>
- UNIATMOS. <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>
- Van Vuuren, D., K. Riahi. 2008. Do recent emission trends imply higher emissions forever? *Climatic Change*, 91(3-4):237-248.
- Vargas, R. 2013.
http://www.pincc.unam.mx/congresonacional2013/documentos_descargables/PDF/VargasCastillejaRociodelCarmen.pdf.
- Velasco, G. 2014. Incidencia climática y de cambio climático en infecciones respiratorias agudas en el Distrito Federal. Tesis de licenciatura. Col. de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Vieyra, A. 2009. Proyectos productivos y expansión urbana en el suelo de conservación del sur del Distrito Federal. En: *Periferia Urbana. Deterioro ambiental y reestructuración metropolitana*. Coordinadores: Adrián Guillermo Aguilar e Irma Escamilla. UNAM, Inst. de Geografía, Porrúa Eds. Estudios Urbanos Serie.
- Yagüe, C., M. Martija, J. Torres, A.I. Maldonado y E. Zurita. 2006. Análisis estadístico de las olas de calor y frío en España. En XXIX Jornadas Científicas de la AME. Aplicaciones Meteorológicas, 6pp. ISBN-13:978-84-611-1490-0.
- Ward, P. 1990. México: *una megaciudad. Producción y reproducción de un medio ambiente urbano*. Alianza Ed. CONACULTA.
- Wilches-Chaux, 1993. Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. En: *Los desastres no son naturales*. Cap. III. Compilador A. Maskrey. La Red.
- Willems, P., K. Arnbjerg-Nielsen. 2012. Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Atmospheric Research*. Vol. 103, pp. 106-118.
- World Resources Institute: Aqueduct Water Risk Atlas:
<http://www.wri.org/applications/maps/aqueduct-atlas/#x=-15.38&y=1.27&s=ws!20!28!c&t=waterrisk&w=def&q=0&i=BWS-16!WSV-4!SV-2!HFO-4!DRO-4!STOR-8!GW-8!WRI-4!ECOS-2!MC-4!WCG-8!ECOV-2!&tr=ind-1!pri-1&l=2&b=terrain&m=single-HFO>.