



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA**

**MITIGACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA: ESTUDIO DE
CASO DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA

MÓNICA DE JESÚS BALLINAS OSEGUERA

JURADO EXAMINADOR

Dra. María Engracia Hernández Cerda	(Presidente)
Dr. Aron Jazcilevich Diamant	(Vocal)
Dr. Víctor Luis Barradas Miranda	(Secretario)
Dra. Telma Gloria Castro Romero	(Suplente)
Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda	(Suplente)



México, D.F.

Octubre 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto es una forma explícita de redactar lo que nuestro trabajo entre el Dr. Víctor L. Barradas y yo, queríamos lograr. Estoy agradecida por estos años de apoyo y enseñanza para lograr trabajar con la atmósfera acompañada del conocimiento extraordinario del Doctor con la ecología. Es un honor para mí, estar en esta línea de investigación Interacción planta-atmósfera. Sin su ayuda, esta tesis no se hubiera logrado.

A mi jurado examinador por enriquecer esta tesis: Dr. Aron Jazcilevich Diamant, Dra. Telma Castro Romero, Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda y Dra. María Engracia Hernández Cerda.

A mis maestros, que sin ellos no se hubiera podido tener el conocimiento básico. Sobre todo al Dr. Aron Jazcilevich por darme la oportunidad de enseñarme en un semestre el amor a la maestría.

Al comité de los exámenes interanuales: Dr. Aron Jazcilevich y Dra. Irma Rosas, por sus acertados y enriquecedores comentarios y sugerencias.

El apoyo por parte de CONACYT al financiar todo el transcurso de mi maestría.

Al Dr. Caetano Dos Santos, por ser tan amable y otorgarme su atención durante mi estancia en la maestría.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra por el apoyo proporcionado, sobre todo, en mi estancia académica en el Centro de Estudios Geográficos de la Universidade de Lisboa en Portugal, ya que por ésta pude conocer otra forma de enseñar.

Al Instituto de Ecología por la infraestructura brindada y al M. en I. Alejandro González Ponce y al Ing. Daniel Valle, por la ayuda prestada con el desempeño del equipo y de los programas de computación.

Al Biólogo Gerardo Rodríguez Tapia por su ayuda en la elaboración de cartas de temperatura en un sistema de información geográfica.

Al Ing. Humberto Peraza Villareal, por su apoyo técnico.

Al responsable administrativo Gustavo Mateos, por su atención prestada en todo este tiempo.

A la Dra. María João Alcoforado, por brindarme su apoyo para visitar el Centro de Estudios Geográficos, siempre diré que es una mujer admirable; y sobre todo, a mis maestros allá, que sin ellos, no hubiera aprendido tanto.

Al proyecto PAPIIT-DGAPA, No. IN213209. “Vegetación urbana: una alternativa de mitigación de la polución térmica citadina”

...Todo lo aprendido durante estos dos años se ven reflejados en la aplicación teórica y práctica de esta tesis.

DEDICATORIA

A mi familia.

A mi angelito.

A mi amor.

A todos los que creyeron en mí.

Índice

I.	Índice de figuras	
II.	Índice de tablas	
III.	Acrónimos	
1.		
Resumen		12
2.		
Antecedentes		
2.1	Isla de Calor Urbana	15
2.2	La Isla de Calor Urbana y la Salud Humana	19
2.3	La Isla de Calor Urbana y la Meteorología	20
2.4	La Vegetación Urbana	21
3.		
Hipótesis y objetivos		
3.1	Hipótesis	23
3.2	Objetivo General	23
3.3	Objetivos Particulares	23
4.		
Materiales y método		
4.1	Materiales	24
4.2	Método	28
5.		
Sitio de estudio		
5.1	Localización del Sitio de Estudio	32
5.2	Clima	34
5.3	Vegetación y Uso del Suelo	34

6.	
Resultados y discusión	
6.1 Localización y Evolución de la Isla de Calor de la Zona Metropolitana de Ciudad de México	38
6.2 Intensidad de la Isla de Calor Urbana de Zona Metropolitana de Ciudad de México	48
6.3 Déficit de presión de vapor	56
6.4 Determinación de la Polución Térmica	57
6.5 Mitigación de la Isla de Calor Urbana	60
7.	
Conclusiones	66
8.	
Referencias	68
Anexo único	73

I. Índice de figuras

Figura 2.2.1.- Perfil térmico típico de la isla de calor urbana (ICU) (modificado de: <http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/HighTemps/>, fecha de consulta 16 de junio de 2011).

Figura 4.2.1 Distribución espacial de la estaciones de la red meteorológica del SIMAT (cuadro azul) en la zona metropolitana de la Ciudad de México (<http://www.sma.df.gob.mx/corena>, fecha de apoyo: 14 de marzo de 2011).

Figura 5.1.1 Configuración de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, distribución de la vegetación y distribución espacial de la estaciones de la red meteorológica del SIMAT.

Figura 5.3.1 Distribución climática de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México correspondiente al Distrito Federal (<http://www.inegi.org.mx>, fecha de apoyo 29 de marzo de 2011).

Figura 5.3.2 Distribución climática de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México correspondiente al Estado de México (<http://www.inegi.org.mx>, fecha de apoyo 29 de marzo de 2011).

Figura 6.1.1a Evolución de la ICU en la ZMCM de las 02:00 a las 12:00 hl en el mes de enero de 2009 cada dos horas.

Figura 6.1.1b Evolución de la ICU en la ZMCM de las 14:00 a las 24:00 hl en el mes de enero de 2009 cada dos horas.

Figura 6.1.2a Evolución de la ICU en la ZMCM de las 02:00 a las 12:00 hl en el mes de febrero de 2009 cada dos horas.

Figura 6.1.2b Evolución de la ICU en la ZMCM de las 14:00 a las 24:00 hl en el mes de febrero de 2009 cada dos horas.

Figura 6.1.3a Evolución de la ICU en la ZMCM de las 02:00 a las 12:00 hl en el mes de mayo de 2009 cada dos horas.

Figura 6.1.3b Evolución de la ICU en la ZMCM de las 14:00 a las 24:00 hl en el mes de mayo de 2009 cada dos horas.

Figura 6.1.4a Evolución de la ICU en la ZMCM de las 02:00 a las 24:00 hl en el mes de junio de 2009 cada dos horas.

Figura 6.1.4b Evolución de la ICU en la ZMCM de las 14:00 a las 24:00 hl en el mes de junio de 2009 cada dos horas.

Figura 6.2.1 Diferencia de temperatura T_{U-R} (°C), en el mes de enero de 2009. a) La Merced-Chapingo, b) Villa de la Flores-Chapingo, c) Tlalpan-Chapingo, d) ENEP Acatlán-Chapingo.

Figura 6.2.2 Diferencia de temperatura T_{U-R} (°C), en el mes de febrero de 2009, a) La Merced-Chapingo, b) Villa de la Flores-Chapingo, c) Tlalpan-Chapingo, d) ENEP Acatlán-Chapingo.

Figura 6.2.3 Diferencia de temperatura T_{U-R} (°C), en el mes de junio de 2009, a) La Merced-Chapingo, b) Villa de la Flores-Chapingo, c) Tlalpan-Chapingo, d) ENEP Acatlán-Chapingo.

Figura 6.2.4 Diferencia de temperatura T_{U-R} (°C), en el mes de julio de 2009, a) La Merced-Chapingo, b) Villa de la Flores-Chapingo (no hubo datos), c) Tlalpan-Chapingo, d) ENEP Acatlán-Chapingo.

Figura 6.2.5 Diferencia de temperatura T_{U-R} ($^{\circ}\text{C}$), en el mes de mayo de 2010, a) La Merced-Chapingo, b) Villa de la Flores-Chapingo, c) Tlalpan-Chapingo, d) ENEP Acatlán-Chapingo.

Figura 6.2.6 Diferencia de temperatura T_{U-R} ($^{\circ}\text{C}$), en el mes de junio de 2010, a) La Merced-Chapingo, b) Villa de la Flores-Chapingo, c) Tlalpan-Chapingo, d) ENEP Acatlán-Chapingo.

Figura 6.3.1 Déficit de presión de vapor (DPV) en cinco estaciones seleccionadas en el mes de enero (línea café), febrero (línea azul), junio (línea roja) y julio (línea verde) del 2009. EAC = ENEP Acatlán, MER = La Merced, VIF = Villa de las Flores, TPN = Tlalpan y CHA = Chapingo.

Figura 6.4.1 Índice de Confort Térmico PET en a) enero, b) febrero, c) mayo y d) junio en el año 2009 para la estación de La Merced.

Figura 6.4.2 Índice de Confort Térmico en a) mayo y b) junio el año 2010, para la estación de La Merced.

Figura 6.5.1. Relación entre el flujo de calor sensible (Q_H) y la temperatura del aire (T_A) en sitios de diferente uso del suelo en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Figura 6.5.2 Transpiración en dos sistemas arbolados semejantes a los parques urbanos.

Figura 6.5.3 Simulaciones o escenarios de la mitigación de la isla de calor urbana de la ZMCM correspondientes a dos fechas con datos actuales en la época seca (a) (26 mayo 2009, 15:00 h) y en la época húmeda (b) (08 junio 2009, 17:00 h) en los sistemas 1 (c, d) y 2 (e, f).

II. Índice de tablas

Tabla 4.1.1 Intervalos de la temperatura fisiológica equivalente (PET) en diferentes grados de percepción térmica y estrés fisiológico en seres humanos, con factores típicos de producción de calor (80 W) y resistencia a la transferencia de calor por el vestido (0.9 clo) (Matzarakis y Mayer, 1996).

Tabla 4.2.1 Nombres y ubicaciones de la estaciones de la red meteorológica (<http://www.sma.df.gob.mx/corena>, fecha de apoyo: 14 de marzo de 2011).

Tabla 6.5.1. Resumen del balance de energía cuando $Q_N > 0$ en dos sistemas arbolados semejantes a parques urbanos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Los valores son la media horaria de los flujos en $W m^{-2}$.

III. Acrónimos

ICU	Isla de Calor Urbana
IMP	Instituto Mexicano del Petróleo
PET	Temperatura Fisiológica Equivalente
REDMET	Red Meteorológica
SAA	Sistemas de Acondicionamiento de Aire
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México
BH	Balance de Energía
Q_E	Calor Latente
DPV	Déficit de Presión de Vapor
ENEP	Escuela Nacional de Estudios Superiores
HR	Humedad Relativa

1.

Resumen

La isla de calor urbana (ICU) es una de las formas más conocidas de cambio climático debido al aumento de la temperatura del aire que experimenta el área urbana con respecto a sus alrededores. Este fenómeno cada vez es más notable en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) y que se ha generado principalmente por el crecimiento urbano desmedido que a su vez implica un cambio drástico del uso del suelo. Un efecto inmediato del incremento de la temperatura, es el estrés térmico que pueden experimentar las personas por exceso de calor a lo que se puede llamar Polución Térmica. Este estrés puede inducir una disminución en la calidad y eficacia de la productividad humana, para lo que se han instalado sistemas de acondicionamiento de aire (SAA) en los centros de trabajo con el fin de mejorar el confort térmico humano y con ello obtener una mayor productividad, con una considerable elevación en el consumo de energía. No obstante, estos SAA son muy ineficientes, por un lado, y por el otro, el calor del interior es puesto en el exterior produciendo un aumento de la temperatura con lo que se realiza el efecto de la isla de calor.

Esta investigación se enfocó en la determinación reciente de la ICU (2009 y 2010) en la ZMCM y su mitigación a través del estudio del balance de energía (BH). Desde este punto de vista, para reducir la temperatura del aire fue posible modificar algunos términos del BH. En este trabajo solamente se seleccionó variar el flujo de calor latente (Q_E), modificando el uso del suelo al incrementar la cantidad de áreas verdes en diferentes sitios de la ZMCM. El principal objetivo de esta investigación fue el de determinar la distribución e intensidad de la ICU y de la polución térmica, así como la determinación de las tasas de transpiración (Q_E) de diferentes especies de árboles (perennes y caducifolias) nativas y exóticas para crear una mayor diferencia de temperatura que la actual de acuerdo a las zonas ocupadas y también diseñando nuevas áreas para mitigar la ICU. La distribución e intensidad de la isla de calor de la ZMCM se realizó utilizando datos meteorológicos de las 16 estaciones que conforman la Red Meteorológica (REDMET) y que se encuentran estratégicamente distribuidas en la zona urbana. Con los mismos datos de la REDMET se estimó la temperatura fisiológica equivalente (PET) para determinar la polución térmica.

En la Ciudad de México existe un efecto muy marcado de la ICU, por ejemplo, opuesto a lo propuesto de que la ICU es un fenómeno totalmente nocturno, en algunos sitios se presentó durante todo el día con diferencias de hasta 10 °C entre el área central de la ciudad (La Merced y/o Villa de las Flores) y el área rural (Chapingo); mientras que en otros fue la ICU típica (Tlalpan). La zona que abarca principalmente el área más cálida se encontró entre las estaciones de la ENEP-Acatlán, Villa de las Flores, San Agustín, Cerro de la Estrella y Plateros, y en algunas ocasiones se extendió hasta Tlalpan. La ICU fue más intensa en los meses fríos secos que en los cálidos húmedos, aunque en estos últimos una pequeña diferencia de temperatura pudo implicar un cambio grande en la PET. Las estimaciones de la PET a través del año en diferentes estaciones meteorológicas indicaron que en los meses fríos secos las personas pueden experimentar un estrés por frío mayoritariamente y que solo aproximadamente 6 horas al día se encontraban en confort térmico; mientras que en los meses cálidos húmedos, se experimentó el estrés por calor o polución térmica entre las 10:00 y las 17:00 h. Un aspecto interesante de notar, fue que en la estación IMP (Instituto Mexicano del Petróleo) apareció una zona de menor temperatura que sus alrededores, probablemente generada porque se encuentra rodeada de una gran área verde.

La construcción de sistemas arbolados de dos tipos, mostró la factibilidad de utilizarlos como sistemas de enfriamiento natural para mitigar la ICU. En un sistema compuesto principalmente por especies arbóreas nativas (sistema 1) se estimó que el flujo de calor sensible fue 0.70 veces el flujo de calor latente, mientras que otro con especies de rápido crecimiento (sistema 2) la razón de Bowen fue de 0.28, lo que indicó que este último tiene un poder de enfriamiento mayor que el sistema 1. Mientras que la razón de Bowen fue de 8.5 en un sitio totalmente urbano (Palacio de Minería).

Es evidente que para mitigar la isla de calor y eliminar la polución térmica, los arreglos con vegetación urbana, principalmente árboles, fueron una alternativa viable que se debe tomar en cuenta en el reordenamiento u ordenamiento territorial de la ZMCM. Los árboles al transpirar tienen una respuesta similar al comportamiento diurno de la temperatura o de la radiación solar con lo que en las primeras horas de la mañana o en las últimas de la tarde el enfriamiento que inducirán será relativamente bajo, no siendo así en las horas de

más alta radiación solar o de temperatura. Por otro lado, generar este tipo de información puede ser valioso para los administradores ambientales o arquitectos de paisaje o ingenieros, así como determinar niveles máximos de temperatura del aire permisibles que no afecten la productividad humana, generación de normas y probablemente leyes que no permitan temperaturas por encima de las permisibles. Es también evidente que la reducción de la intensidad de la ICU puede implicar un menor uso de los SAA y con ello un menor consumo de energía que genera una disminución de los gases invernadero y de contaminación ambiental.

Las estaciones de la REDMET fueron de gran utilidad para el desarrollo de esta investigación; sin embargo, la densidad de ésta no es adecuada para este tipo de estudios teniendo muy poca precisión en la distribución e intensidad de la ICU. Probablemente, podría ser posible obtener una mejor precisión analizando imágenes de satélite para así determinar la distribución e intensidad de la isla de calor urbana y el índice térmico de confort ya que éstas pueden llegar a tener hasta una resolución de 1x1 km.

2.

Antecedentes

2.1 La Isla de Calor Urbana

La isla de calor urbana es una reflexión de cambios microclimáticos totales como consecuencia de las alteraciones que experimenta la superficie urbana (Landsberg, 1981). Muchos de los estudios que se han realizado alrededor del mundo, afirman que las ciudades son más cálidas que sus alrededores, esto quiere decir que la zona urbana es más cálida que la zona rural.

Se han realizado muchos estudios en grandes ciudades como Tokio, Nueva York, Ciudad de México, París, etc., desde siglos anteriores. Entre ellos destaca el que realizó Luke Howard, uno de los pioneros en la investigación del fenómeno de isla de calor urbana, por sus estudios del clima de Londres, Reino Unido, lugar en el que él residía, y que encontró un exceso de calor artificial en la ciudad comparada con las zonas rurales. Otro investigador que realizó estudios urbanos de este tipo fue Emilien Renou en Francia (1815-1902), quien instaló varios termómetros en toda el área urbana, encontrando que la temperatura aparente se incrementaba de 1 a 2 °C. En 1868 realizó otro estudio, ahora con la instalación de termómetros dentro y fuera de la ciudad. En esos resultados encontró que la diferencia de temperatura era de 1 °C a la misma altitud (Landsberg, 1981).

Wilhelm Schmidt, también fue uno de los precursores en el estudio de este fenómeno urbano, ya que realizó en Viena, Austria, algunos estudios a principios del siglo XV (Gartland, 2008). Por lo que se tiene que el fenómeno de la isla de calor, está presente en todas las ciudades, no importa el tamaño de éstas ni de su localización, ni mucho menos de su latitud (Capelli de Steffens; *et al.*, 2005). Por tanto, la isla de calor es un fenómeno meteorológico-climático que se encuentra en todas las áreas urbanas de todo el planeta (Gartland, 2008).

La zona urbana, es como un islote, ya que presenta perfiles de temperatura del aire (T_A) diferentes a las de su entorno. En los estudios hechos, se ha encontrado que en la ciudad

de Londres, el centro urbano tiene una temperatura urbana (T_U) de 11 °C, en la periferia la es de 10.3 °C y en el campo o área rural (T_R) de 9 °C, haciendo una diferencia entre T_U y T_R de 2 °C ($T_{U-R}=2^{\circ}\text{C}$). Por otro lado, en Paris, en el centro se encuentra una temperatura de 12.3 °C mientras que en la periferia es de 10.8 °C ($T_{U-R}=1.5^{\circ}\text{C}$). Esto no quiere decir que exista sólo una isla de calor, y que necesariamente tiene que coincidir con el centro de la ciudad; si no que pueden existir varias islas (archipiélago) dispersadas en toda la ciudad (Seoáñez, 2002). Es bien conocido que el crecimiento de una ciudad causa un cambio drástico en la temperatura y la humedad del aire (Jauregui, 1986). En la figura 2.2.1 se muestra esquemáticamente el comportamiento de la temperatura en un corte horizontal urbano.

El hecho de que en un lugar en particular se eleve la temperatura, es una manifestación de que ha sido urbanizada (Landsberg, 1981), aunque en general existen otros tipos de islas de calor como la producida por el cambio del uso del suelo; por ejemplo, un pastizal en medio de un bosque, o las islas oceánicas que durante el día son mas cálidas que sus alrededores marítimos. En el caso de la ciudad, se encuentra que en su mayoría es el centro de las actividades humanas generadas por la industria y el comercio principalmente provocando una fuente permanente de calor. Por tanto, que un lugar se encuentre urbanizado lleva a que se altere la cobertura superficial, teniendo una gran densidad en las estructuras urbanas, incrementándose el calor antropogénico, y el almacenamiento de calor, además de afectar la velocidad del viento (Moschida, A. *Japanese Experience of Technology and Policy for Urban Heat-Island Mitigating*. http://www.scholar.google.com/scholar?q=Japanese+Experience+of+Technology+and+Polic+y&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart, fecha de apoyo: 29 de marzo de 2011).

Esto aunado a los materiales usados para la construcción de edificios y las calles tales como el cemento, ladrillos, asfalto, etc., provocan por un lado, un cambio del albedo (Capelli de Steffens, *et al.* 2005), y por otro lado, almacenan lentamente una gran cantidad de calor durante el día y que es reemitido también muy lentamente durante la noche con lo que se tiene el efecto de isla de calor que es un fenómeno generalmente nocturno ya que el área suburbana o rural se calienta o se enfría más rápidamente que el área urbana porque hay una cantidad menor de materiales urbanos (Gartland, 2008). Sin embargo, la

ICU es notable por la noche en días con cielos despejados debido a que los vientos son muy ligeros (Basara *et al.* 2010).

Aún tomando en cuenta el albedo, una de las razones por las cuales la energía proveniente del Sol es absorbida en el área urbana, no sólo depende de sus propiedades físicas o de estos tipos de superficies sino también de la configuración dentro del paisaje urbano, la meteorología local y el microclima de esa zona (Oke, 1987; Salior, 1995).

El autor Oke, es uno de los investigadores principales de la ICU de nuestros tiempos, en uno de sus estudios, él menciona que la temperatura de una localidad aumenta 1°C cada vez que la población de ese lugar se multiplica por 10 (Cañizares, 1998).

Perfil térmico horizontal de la Isla de Calor Urbana

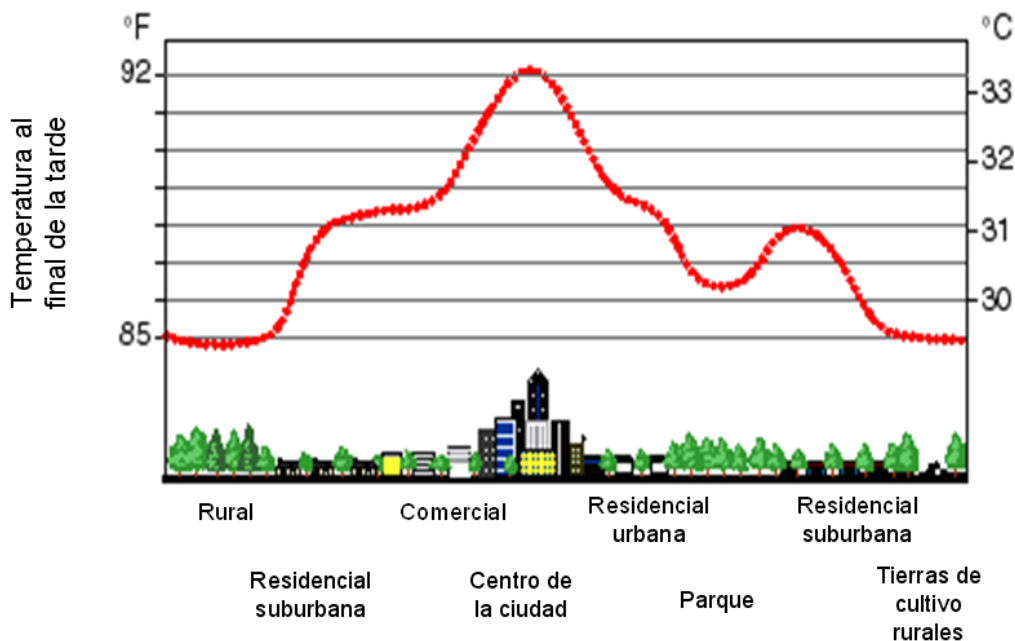


Figura 2.2.1.- Perfil térmico típico de la isla de calor urbana (ICU) (modificado de: <http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/HighTemps/>, fecha de consulta 16 de junio de 2011).

Las áreas urbanas y suburbanas han sido estudiadas en lugares situados en cualquier parte de la ciudad donde la temperatura del aire y de la superficie son más cálidas que sus

alrededores, al igual que la parte rural que es menos cálida (Gartland, 2008). No obstante, a los parques urbanos o a las áreas con vegetación se les considera pequeños oasis, porque están más fríos y húmedos que sus alrededores, y que son de gran ayuda para crear un mosaico urbano de microclimas con un probable confort térmico mejor que sus alrededores (Barradas, 1991; Barradas, 1999).

Se piensa que el calor generado en las fábricas o en las casas-habitación tiene una gran influencia en el incremento de la temperatura urbana. Desde que las fuentes de calor se concentran en la ciudad, la temperatura se torna más alta que las de las áreas aledañas (Yoshino, 1975).

Toda esta situación de la isla de calor urbana, lleva a la necesidad de enfriar artificialmente el interior de los edificios, induciendo un aumento considerable en el consumo de energía y el que también en algunos sitios aumente la demanda de agua para la irrigación de siembras. Todo esto se refleja en un incremento en los costos energéticos (Wong Hien, 2009).

En la Ciudad de México, en 1996 la venta de energía eléctrica al sector doméstico por la Comisión Federal de Electricidad fue de 28,400 GW h⁻¹, 23.4% del consumo total 121,579 GW h⁻¹. De esta energía consumida por el sector doméstico, 20% se requirió para acondicionar el ambiente en el interior de edificaciones (aire acondicionado, enfriamiento evaporativo, ventiladores) (Ramos, 1998), y el 30% en edificios comerciales y de servicios de la zona metropolitana. Estos sistemas que tienen una muy baja eficiencia “sacan” el calor de los edificios y lo “ponen” en el exterior produciendo una retroalimentación en la que se incrementa la polución térmica y el consumo de energía. Por ello, la Comisión Nacional de Ahorro de Energía de la Secretaría de Energía y el Fideicomiso de Ahorro de Energía promueven proyectos y normas que propicien un uso más eficiente de la energía.

Para esto es indispensable para la planeación urbana considerar muy formalmente la mitigación de la isla de calor mediante la ubicación adecuada de los diferentes elementos urbanos. Así, al mitigar la isla térmica no solo se ganará en ahorro de energía, sino que indirectamente se disminuirá la cantidad de gases invernadero depositados en la

atmósfera y con ello un menor calentamiento global y por otro lado el impacto que pueda tener en la salud humana.

2.2 La Isla de Calor Urbana y la Salud Humana

La isla de calor urbana afecta directamente la carga de calor humana y las personas pueden experimentar un fuerte no confort térmico (estrés térmico, índices de confort bioclimático) que afecta notablemente su productividad principalmente en el ciclo primavera-verano. En la actualidad se han implementado sistemas de aire acondicionado para combatir este tipo de contaminación con un consumo extra de energía (principalmente eléctrica) como se mencionó anteriormente.

El efecto de la ICU, se relaciona con el estrés térmico de las personas y muchas veces este fenómeno también afecta a la salud humana (Wong Hien N, 2009). Algunas enfermedades relacionadas con este fenómeno, están influenciadas por el impacto que se le da a los ecosistemas incluyendo a los animales, a las plantas y el tiempo atmosférico (<http://www.sma.df.gob.mx/corena/> fecha de apoyo: 14 de marzo de 2011).

Se le atribuye al cambio climático (el clima urbano es un caso típico de cambio climático) algunas alteraciones en la salud humana debido al incremento de la temperatura ya que incrementa la morbilidad y la mortalidad en muchas regiones del mundo (Patz, *et al.* 2005).

A las temperaturas que oscilan entre los 29 y 38 °C durante varios días, se les llama olas u ondas de calor y con una humedad relativa (HR) entre los 68 y el 80% aunque también existen las mínimas entre los 20 y 28 °C y HR de 70 a 90%. Estas olas de calor, aparte de provocar la muerte de humanos, numerosos estudios indican que algunos segmentos de la población son más susceptibles a las temperaturas extremas que otros, y esto debido a que se incrementa la temperatura drásticamente. Esta susceptibilidad se debe a la exposición desproporcional, como los factores médicos o biológicos que están relacionados con la edad y el estado anémico de la persona. Sin embargo, en la Ciudad de

México se encontró que las mujeres son más vulnerables que los hombres a estos cambios drásticos de temperatura (Bell, 2008).

Los procesos atmosféricos asociados a las ondas de calor, involucran anomalías significativas en la troposfera media que producen periodos extensos de subsidencia, cielos despejados, vientos ligeros, advección de aire tibio y temperaturas altas por arriba de la normal. Por ello, las ondas de calor impactan grandes áreas geográficas (Kunkel, 1996; Basara, 2010).

2.3 La isla de Calor Urbana y la Meteorología

La diferencia entre los topoclimas, y la no similitud entre los flujos radiativos y los cambios turbulentos, se ven claramente en los contrastes térmico en condiciones de calma y cielo despejado, que tienden a desaparecer cuando hay nubosidad y viento en el área. Bajo el régimen de temperatura se puede ver la diferencia entre el área rural y la urbanizada (Landsberg, 1981).

En latitudes altas, el aire es más frío, aunque también se incluye a los desiertos, la diferencia de la temperatura del aire en la parte urbana-rural durante el día puede ser menor a cero, creando a lo que llamamos “isla fría” (Gartland, 2008).

Cerca del amanecer, de dos o tres horas después, la isla de calor presenta su valor máximo. Esto se debe a que la ciudad pierde el calor de forma más lenta que en la periferia o el campo. Durante el día las zonas rurales se calientan más rápido que la ciudad, siendo inferior así la diferencia entre ellas. Cuando las condiciones que reinan son casi estables o de vientos moderados, la pluma de contaminantes es transportada hacia las afueras de las ciudades e incrementan sus concentraciones, mientras que las situaciones en donde hay calma hacen que se formen células y circulaciones convectivas que crean domos que concentran la contaminación sobre la ciudad, este hecho hace que se favorezcan las islas de calor (Seoáñez, 2002).

El efecto de la ICU nos conduce a mecanismos que influyen directamente en la contaminación de la atmósfera urbana dentro de la ciudad y esto a su vez, nos trae como consecuencia la contaminación de sus alrededores (Wong Hien, 2009), acarreados por el viento local. El problema es tal, que en Tokio, la intensidad de la precipitación local ha aumentado por el efecto de la isla de calor. Las características de la ICU dependen grandemente del área urbana (Sadhiro, 2008).

2.4 La Vegetación Urbana

La vegetación juega un papel muy importante en el microclima del medio ambiente urbano (Jauregui, 1975; Sproken-Smith, 1990; Barradas, 1991; Sproken-Smith, y Oke, 1998; Barradas, *et al.*, 1999). No obstante, de acuerdo a Kiran, *et al.* (2004) los arbustos, el pasto, los árboles y toda la vegetación en general es principalmente una de las primeras víctimas de la urbanización. Esto indica que la relación entre las plantas y los edificios de los alrededores de estos primeros es tensa. El impacto de los edificios con la urbanización verdosa es definitivamente negativo. Primero que nada, los edificios en las ciudades tienen una gran influencia en la biodiversidad de las plantas desde que las plantas nativas son desplazadas por las introducidas (Wong Hien y Chen, 2009).

Tan sólo en Ciudad de México, se pierden anualmente cerca del 1.5% de las áreas verdes urbanas con el fin de optimizar el tránsito vehicular (Ezcurra, 1995) y que actualmente no deja de ser una excepción. Los ahorros de energía y la mitigación de los efectos de la isla de calor se pueden alcanzar mediante estrategias que involucren a la reforestación y posiblemente el incremento en el albedo de los materiales superficiales. En un ambiente urbano, es bien conocido que las plantas en general y los árboles en particular, al transpirar, redistribuyen la energía con un resultado de menor caldeoamiento del aire, formando las llamadas islas “frías” que reducen la temperatura del aire no solo en el sitio donde se encuentran sino hasta dos o tres veces más, el tamaño del área verde (Barradas, 1991; 1998; 1999; 2000).

En la ciudad de México se tiene que un 20.4% del suelo urbano está cubierto por áreas verdes públicas y privadas, del cual el 55.9% es zona arbolada, el resto es zona de pastos y/o arbustos. Estadísticas anteriores decían que el área verde era del 7.3% del suelo urbano, esto se suscita debido a que en esa estimación no se incluyeron a las áreas verdes privadas y las zonas de barrancas, etc., aunque en las áreas privadas la proporción puede cambiar (<http://www.sma.df.gob.mx/corena/> fecha de apoyo: 14 de marzo de 2011).

De las delegaciones de la Ciudad de México, se tiene que la Benito Juárez, es la más pequeña en superficie, pero de densidad urbana alta, su porcentaje de área verde es del 4.5% mientras que la delegación Álvaro Obregón tiene el 40.2% área verde, y las delegaciones Benito Juárez, Tlalpan, Coyoacán y Cuauhtémoc tienen más de 74% de zonas arboladas: Tláhuac tiene el 4.4% e Iztapalapa y Venustiano Carranza menos del 28% de superficie arbolada respectivamente (<http://www.sma.df.gob.mx/corena/> fecha de apoyo: 14 de marzo de 2011).

3.

3.1 Hipótesis

La polución térmica urbana puede ser mitigada eficazmente con arreglos de vegetación urbana distribuidos estratégicamente en la ZMCM.

3.2 Objetivo General

Determinar los niveles de polución térmica urbana y su efecto en el confort térmico humano, así como su mitigación a partir del estudio de la redistribución de la energía y alterarla con la implementación de arreglos de vegetación urbana.

3.3 Objetivos Particulares

Determinar la Isla de Calor Urbana en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

Determinar niveles de polución térmica en función del confort térmico humano.

Determinar el balance de energía en áreas totalmente urbanas y en diferentes arreglos de vegetación urbana.

4.

Materiales y Método

4.1 Método

El marco de trabajo

El balance de energía

El balance de energía permite analizar a partir de la energía disponible en un sitio, las tasas evaporativas y el ambiente térmico del sistema. Un modelo sencillo del balance de energía en una ciudad está dado por la siguiente expresión:

$$Q_N + Q_A = Q_E + Q_H + Q_S + Q_{AD} \quad [W \text{ m}^{-2}] \quad (1),$$

donde Q_N es la radiación neta (energía disponible), Q_A es la energía dada al sistema por la actividad humana (industrias, máquinas de combustión interna, calefacción, aire acondicionado) que en ciudades como la Ciudad de México es nulo, probablemente por que la actividad humana no es significativa (Grimmond, *et al.*, 1996), Q_E es el flujo de calor latente (\approx evaporación/transpiración), Q_H es el flujo de calor sensible (caldeamiento del aire), Q_S es el almacenaje de energía en el tejido urbano y Q_{AD} es el transporte horizontal de energía o advección, que es importante solamente en el borde urbano-rural o cuando la intensidad del viento es alta. La radiación neta está dada por:

$$Q_N = (Q + q)(1 - \alpha) + (I_{\downarrow} - I_{\uparrow}) \quad [W \text{ m}^{-2}] \quad (2),$$

donde Q y q son la radiación solar de onda corta directa y difusa, respectivamente; α es el albedo; I_{\downarrow} y I_{\uparrow} son la radiación de onda larga proveniente de la atmósfera y de la superficie, respectivamente. Todos estos términos son afectados por la contaminación del aire, pero principalmente los términos de radiación infrarroja; sin embargo, si la contaminación en el aire fuera constante, los términos de la variación de Q_N sólo se deberían a la variación de la radiación solar. Un modo de alterar Q_N es modificando el albedo, α y aunque es una técnica permanente, podría tener un efecto en la capa de

contaminantes, y por ello el probable cambio de la temperatura del aire superficial sería muy reducido.

El flujo de calor latente Q_E , es uno de los factores menos complejo de alterar al variar la evapotranspiración de la zona en estudio. Esto se puede lograr implementando en esas zonas arreglos de vegetación adecuada. Las plantas al transpirar liberan calor en forma latente que reduce el flujo de calor sensible y con ello la carga térmica en el ambiente, además de aumentar la humedad del aire y producir un mejor confort bioclimático en las personas.

Una forma de obtener los flujos de calor Q_H y Q_E , es a través del uso de la razón de Bowen ($\beta = Q_H/Q_E$) y la ecuación 1 teniendo en cuenta que el efecto de los otros factores (Q_A , Q_S , Q_{AD}) fuera marginal o constante y despejando Q_E :

$$Q_E = (Q_N + Q_S)/(1 - \beta) \quad (3),$$

donde $\beta = [\rho C_p(T_2 - T_1)/\lambda(q_2 - q_1)]$ y ρ , C_p y λ representan la densidad del aire, el calor específico del aire a presión constante y el calor latente de vaporización del agua, respectivamente. T_2 , T_1 , q_2 y q_1 son la temperatura y la humedad específica del aire a una altura Z_2 y Z_1 , respectivamente, por encima del sistema a medir. El flujo de calor sensible se calcula como el residual del balance de energía $Q_H = Q_N - (Q_E + Q_S)$.

El término advectivo Q_{AD} , es otro factor susceptible de alterarse y que se puede situar en el mecanismo de ventilación. La advección es el transporte horizontal de alguna propiedad de la atmósfera en este caso calor como se puede ver en la siguiente expresión:

$$\Delta T/\Delta t = u\Delta T/\Delta x \quad (4)$$

siendo T la temperatura del aire, t el tiempo, u la intensidad del viento y x la dirección del viento dominante. Si se conoce cómo varía $u\Delta T/\Delta x$ se puede estimar un pronóstico de temperatura para una hora o un día después: $T_{Final} = T_{Inicial} + (u\Delta T/\Delta x)(t)$, siendo t el intervalo de tiempo que se trate (una hora, un día). De aquí que se pueden formar

estructuras de elementos urbanos tales que permitan el paso libre del viento hacia el centro urbano cálido provocando un enfriamiento debido a que el aire alrededor de la ciudad es menos cálido. En este caso hay que determinar que tan importante puede ser este enfriamiento ya que dependerá de la diferencia entre el área rural y urbana y que en Lisboa, Portugal, por ejemplo, llega a ser de 3 a 4 °C ($T_{U-R} = 3-4 \text{ °C}$) (Alcoforado, 1992); no obstante para la ciudad de México podría ser importante ya que $T_{U-R} \approx 10 \text{ °C}$ (Jáuregui, 1996), aunque la mayor parte del tiempo esta diferencia puede ser de hasta 4 °C (Véase el capítulo 6 de este trabajo).

El almacenaje Q_s , es uno de los factores que más absorben energía y que gracias a él, la Isla de Calor Urbana puede ser más intensa (Grimmond y Oke, 1999). Este factor solo depende de la capacidad calorífica y de la conductividad térmica de los materiales de construcción y que en algunos casos como los de Roma, Italia, es el responsable de la ICU sobre todo en las noches (Bonacquisti, *et al.*, 2006). Desde este punto de vista, es recomendable investigar otro tipo de materiales de construcción, aunque el tejido urbano también afecta este factor. El caso más típico para mitigar este efecto sería el de ampliar los espacios abiertos reduciendo la cantidad de material de construcción.

Es importante notar que el flujo más adecuado a alterar es el de calor latente y el que podría tener mejores beneficios, ya no desde el punto de vista de la isla de calor urbana, sino desde la problemática ambiental urbana en general.

La temperatura fisiológica equivalente

La temperatura fisiológica equivalente (PET, por sus siglas en inglés) se basa en el balance energético de las personas y se define como la temperatura fisiológica equivalente en cualquier lugar (interiores o exteriores) y equivale a la temperatura del aire en la que, en un arreglo típico interior (sin radiación solar y viento), la carga de calor del cuerpo humano se mantiene con la temperatura de la piel y corporal iguales a las que en las condiciones en que se evalúa (Höppe, 1999). Este índice tiene las ventajas de ser un índice universal y es independiente de la ropa y de la actividad metabólica, se mide o se da en °C y así se puede fácilmente relacionar con la experiencia común, no se basa en medidas subjetivas y

se utiliza tanto en climas templados como en cálidos. La tabla siguiente (Tabla 4) muestra los intervalos de confort de la PET.

Tabla 4.1.1 Intervalos de la temperatura fisiológica equivalente (PET) en diferentes grados de percepción térmica y estrés fisiológico en seres humanos, con factores típicos de producción de calor (80 W) y resistencia a la transferencia de calor por el vestido (0.9 clo) (Matzarakis y Mayer, 1996).

PET	Percepción Térmica	Grado de Estrés Fisiológico
< 4 °C	Muy frío	Estrés frío extremo
4 °C	-----	
	Frío	Estrés frío fuerte
8 °C	-----	
	Fresco	Estrés frío moderado
13 °C	-----	
	Ligeramente fresco	Estrés frío ligero
18 °C	-----	
	Confortable	Sin estrés térmico
23 °C	-----	
	Ligeramente tibio	Estrés caluroso ligero
29 °C	-----	
	Tibio	Estrés caluroso moderado
35 °C	-----	
	Cálido	Estrés caluroso fuerte
41 °C	-----	
> 41 °C	Muy cálido	Estrés caluroso extremo

La PET además de determinar el grado de confort/ no confort térmico humano, también se puede utilizar como un elemento para establecer en qué áreas y en qué tiempos se puede considerar la existencia de polución térmica, entendiendo esto último como un exceso de

calor que genera un estrés caluroso, que en el caso de la PET podría ser por encima de los 29 °C.

4.2 Materiales

Los datos

Distribución e intensidad de la isla de calor urbana

Se utilizaron los datos generados por la red meteorológica (REDMET) de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México que consta de 16 estaciones instaladas en sitios estratégicos como se muestra en la figura 4.2.1 y tabla 4.2.1. Se eligieron los datos de los años de 2009 y 2010, ya que con esos años se tendrá una determinación muy actualizada de la distribución e intensidad de la ICU, aunque también esos años presentan la presencia de El Niño y La Niña, respectivamente. La distribución de la ICU se realizó con promedios mensuales y se trazaron las isóneas correspondientes para cada mes de los años analizados. Mientras que la intensidad de la ICU, se determinó calculando las diferencias de temperatura entre cada una de las estaciones meteorológicas urbanas y la estación rural (T_{U-R}) que fue la ubicada en Chapingo, Estado de México.

Relación entre la temperatura del aire y el flujo de calor sensible

Con datos inéditos generados entre 1995 y 2000 del flujo de calor sensible y con las temperaturas del aire del mismo periodo de diferentes sitios de la ZMCM, se construyeron regresiones simples utilizando un programa computacional. Los flujos de calor (sensible y latente) se determinaron mediante el método de correlación turbulenta y la radiación neta se midió con un radiómetro neto (NR Lite2, Kipp & Zonen, Holanda).

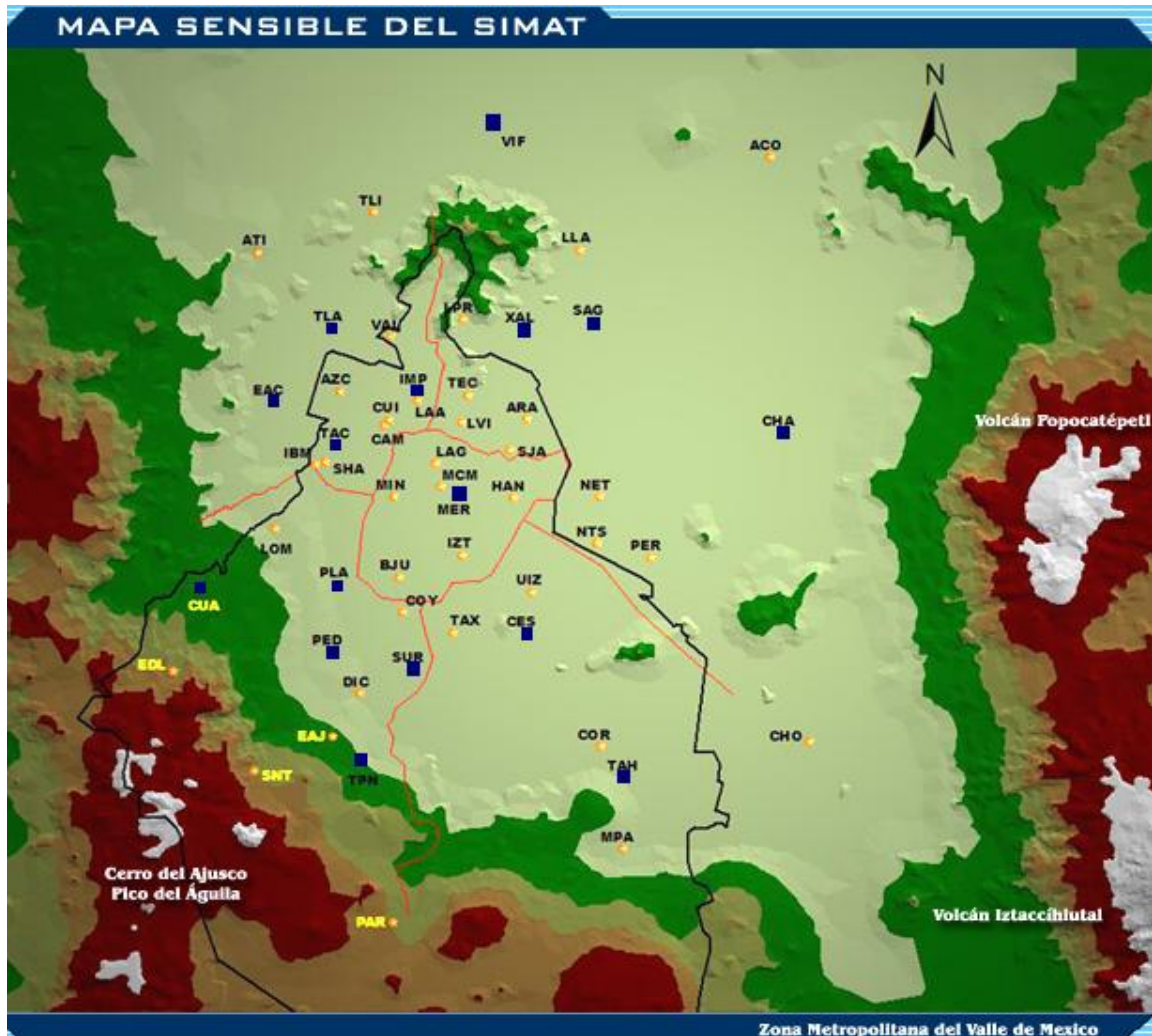


Figura 4.2.1 Distribución espacial de la estaciones de la red meteorológica del SIMAT (cuadro azul) en la zona metropolitana de la Ciudad de México (<http://www.sma.df.gob.mx/corena>, fecha de apoyo: 14 de marzo de 2011).

Tabla 4.2.1 Nombres y ubicaciones de la estaciones de la red meteorológica (<http://www.sma.df.gob.mx/corena>, fecha de apoyo: 14 de marzo de 2011).

ESTACION	NOMBRE	LATITUD °	LONGITUD °
TAC	Tacuba	19.460	-99.194
EAC	ENEP Acatlán	19.490	-99.234
SAG	San Agustín	19.540	-99.017
TLA	Tlanepantla	19.535	-99.195
XAL	Xalostoc	19.533	-99.067
MER	La Merced	19.429	-99.110
PED	Pedregal	19.336	-99.193
CES	Cerro de la Estrella	19.347	-99.062
PLA	Plateros	19.377	-99.188
VIF	Villa de las Flores	19.665	-99.083
CUA	Cuajimalpa	19.373	-99.282
TPN	Tlalpan	19.267	-99.174
CHA	Chapingo	19.474	-98.896
TAH	Tláhuac	19.255	-98.999
IMP	Instituto Mexicano del Petróleo	19.498	-99.133
SUR	Santa Ursula	19.324	-99.138

Polución térmica

Los niveles de polución térmica se determinaron a partir de la evaluación del índice de confort denominado temperatura fisiológica equivalente con datos meteorológicos procedentes de la REDMET y el algoritmo descrito por Matzarakis, *et al.* (2010).

Transpiración

Se utilizaron datos de transpiración inéditos y/o bibliográficos de algunas especies arbóreas urbanas que se encuentran en la ZMCM. Con ello, se construyeron dos arreglos

sencillos tipo, similar a los parques y se calculó la evapotranspiración final de cada uno para determinar la reducción de la temperatura del aire superficial.

5.

Sitio de Estudio

5.1 Localización del Sitio de Estudio

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México, cuenta con 16 delegaciones y 28 municipios del estado de México, y se encuentra en lo que originalmente fue una cuenca hidrológica cerrada, que fue abierta de modo artificial a principios del siglo XVII. Esto incluye al Distrito Federal y partes de los estados de México tales como, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla (Ezcurra y Mazari, 1996). Siendo ésta una de las ciudades más grande del mundo (Barradas *et al.*, 1999). Se extiende sobre un área aproximada de 7,500 km² y se ubica dentro del Eje Neovolcánico Transversal. Su parte más baja es una planicie lacustre y tiene una elevación promedio de 2,240 m snm.

El valle se encuentra rodeado por un conjunto de sierras al este, oeste y sur, y al norte lo limita una serie discontinua de montañas menores. Entre sus picos más altos, localizados al sureste, se encuentran el Popocatepetl y el Iztacíhuatl, con una altitud de 5,465 y 5,230 m snm, respectivamente (Ezcurra y Mazari, 1996) (Fig. 5.1.1).

El último censo de población y vivienda efectuado en el año 2010, arrojo que la ZMCM tiene alrededor de 16, 454.231 de habitantes, donde la Ciudad de México se encuentran 8 851 080 habitantes y Ecatepec de Morelos (zona conurbada) e Iztapalapa son las áreas más pobladas de la zona con 1 656 107 y 1 815 786 habitantes respectivamente (<http://www.inegi.org.mx>, fecha de apoyo 29 de marzo de 2011).

La ubicación de la ZMCM se encuentra dentro del área comprendida de en los extremos norte y sur entre los 19.665 N y -99.083 O que corresponde a Villa de las Flores y 19.255 N y -98.999 O para Tláhuac y en los extremos este y oeste 19.474 N y -98.896 O para Chapingo y 19.373 N y -99.282 O para Cuajimalpa respectivamente (<http://www.inegi.org.mx>, fecha de apoyo 29 de marzo de 2011), véase figura 5.1.1.

Tan sólo el Distrito Federal cuenta con una superficie de 149,000 ha conformada por 16 delegaciones políticas, en la cual el suelo urbano está ocupado con 61,458 ha (el 41%) y el suelo de conservación es de 87,310 ha (59%). De estas 16 delegaciones, siete se encuentran con suelo urbano: Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, Iztacalco, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza y las nueve delegaciones restantes poseen suelo de conservación siendo: Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tlalpan, Tláhuac y Xochimilco. Estos suelos de conservación sirven para la captación e infiltración de agua, la regulación del clima y el mejoramiento de la calidad del aire y el hábitat para la biodiversidad (<http://www.inegi.org.mx>, fecha de apoyo 29 de marzo de 2011).

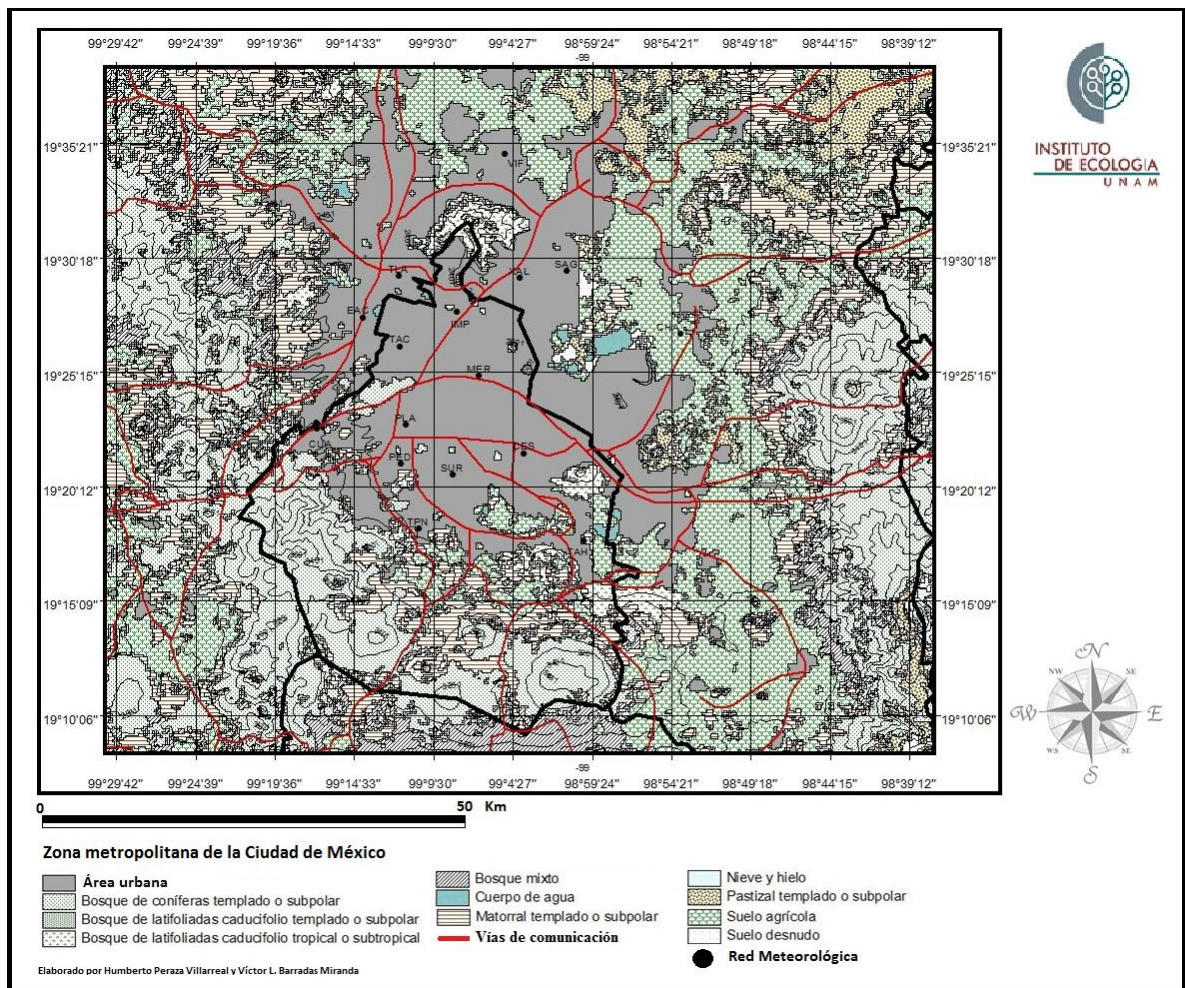


Figura 5.1.1 Configuración de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, distribución de la vegetación y distribución espacial de las estaciones de la red meteorológica del SIMAT.

5.2 Distribución de la Vegetación

El 5% del área aproximada de 7 500 km² de la cuenca de la Ciudad de México está ocupada por vegetación accesible al público (<http://www.inegi.org.mx>, fecha de apoyo 29 de marzo de 2011).

Se tiene que en el suelo urbano el 20.4% está cubierto por áreas verdes públicas y privadas, del cual el 55.9% son zonas arboladas y el resto son zonas de pasto y/o arbustos. Dentro de la superficie verde, el 56% es superficie arbolada y el 44% es zona de pastos y arbustos: en las cuales las delegaciones Benito Juárez, Tlalpan, Coyoacan y Cuauhtemoc tienen por encima del 74% de superficies arboladas; sin embargo, Tláhuac sólo tiene el 4.4% y Venustiano Carranza e Iztapalapa están por debajo del 28% de superficies arboladas.

Como se puede observar en la figura 5.1.1, el área urbana metropolitana ocupa poco menos de la mitad de la región, no obstante, esa área es en parte de agricultura de temporal. En el sur se puede encontrar que predomina el bosque de pino, parte de pastizales, y una pequeña área de bosque de oyamel (<http://www.inegi.org.mx>, fecha de apoyo 29 de marzo de 2011).

En la parte oeste se tiene bosque de pino, selva baja, bosque de oyamel y un área de agricultura de temporal. El pastizal, se encuentra distribuido a lo largo de la parte sur de la zona, pero también se puede observar en la parte norte y en el este y oeste.

5.3 Clima

Por su situación geográfica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y siendo una zona lacustre que se encuentra en la zona intertropical, su clima es tropical modificado por la altitud y su relieve. Se tiene que el 57% del territorio presenta clima templado, 33% climas semifríos y el 10% es clima semiárido (Fig. 5.3.1). Por la clasificación de Köppen es templado en gran parte de la cuenca, la parte centro y sur es seco tipo estepa, en el norte

y oriente las lluvias son escasas, aunque en la parte centro-oriente es una zona semiárida (Jáuregui, 2000).



Figura 5.3.1 Distribución climática de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México correspondiente al Distrito Federal (<http://www.inegi.org.mx>, fecha de apoyo 29 de marzo de 2011).

El Distrito Federal y la zona conurbada de la Ciudad de México, se encuentran dentro de la zona intertropical, debido a esto su temperatura es alta, aunque es modificado por la altitud

y el relieve. En la figura 5.2.1, se muestra que la mayor área de la zona está influenciada por el clima templado subhúmedo con lluvias en verano, esto es el 57% del territorio presenta clima templado, el 33% clima semifrío y el 10% clima semiárido.

Del norte hacia el noroeste, centro, centro-sur y este, se distribuye el clima templado subhúmedo con lluvias en verano. Esta extensa zona tiene una altitud que va de 2 250 m en Iztapalapa a 2 900 m en la Sierra de Guadalupe, en las laderas orientales de la Sierra de las Cruces y en las laderas boreales de la Sierra Ajusco-Chichinautzin; en ella, la temperatura media anual varía de 12 °C en las partes más altas a 18 °C en las de menor altitud, en ese mismo orden, la precipitación total anual va de 600 a 1 000mm y el periodo en que se concentra la lluvia es en el verano.

El clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano se localiza bordeando por el sur la zona antes descrita. Se muestra como una franja orientada noroeste-sureste y comprende los terrenos de mayor altitud (de 2 900 m hacia arriba) en las sierras De las Cruces y Ajusco-Chichinautzin. Su temperatura media anual llega a 12°C en las partes más bajas de la zona y a 5 °C en las cimas de las sierras; la precipitación total anual va de 1 000 a 1 500 mm.

En los terrenos cercanos a los límites suroeste y sur del Distrito Federal se presenta el clima semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano. Este cubre 10% de la superficie de la entidad en las vertientes occidental y sur de los cerros La Cruz del Marqués (Ajusco) y Pelado, y el Volcán Chichinautzin. La temperatura media anual varía dentro del mismo rango del clima semifrío subhúmedo, pero la precipitación total anual es un poco mayor; pues va de 1 200 a más de 1 500 mm.

La zona menos húmeda está situada en los alrededores del aeropuerto internacional de la Ciudad de México y hacia el norte del mismo aeropuerto; pertenece al clima semiárido templado con lluvias en verano, que tiene como características distintivas en estos lugares un rango de temperatura media anual de 14° a 18°C y una precipitación total anual de 500 a 600 mm (<http://www.inegi.org.mx>, fecha de apoyo 29 de marzo de 2011).



Figura 5.3.2 Distribución climática de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México correspondiente al Estado de México (<http://www.inegi.org.mx>, fecha de apoyo 29 de marzo de 2011).

Para el Estado de México, se tiene que gran parte de la zona conurbada de la Ciudad de México, se encuentra dentro del clima templado subhúmedo con lluvias en verano, sin embargo, en la parte suroeste se tienen condiciones semifrías húmedas con lluvias abundantes en verano. Si bien, en la parte noreste se registra el clima semiárido templado.

6.

Resultados y discusión

6.1 Localización y Evolución de la Isla de Calor de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

En las figuras 6.1.1a y b, se muestra la evolución de la isla de calor urbana en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México en el mes de enero del 2009, donde se puede apreciar a partir de las 02:00 hora local (hl) el establecimiento del fenómeno de la isla de calor con una diferencia de hasta 4 °C entre el área urbana (Xalostoc) y el área rural (Chapingo) y situándose del centro hacia el noroeste y norte del Distrito Federal y hacia el sur hasta Tlalpan y Cerro de la Estrella. El crecimiento de la ICU se acentúa mientras pasa el tiempo para alcanzar su mayor tamaño hacia las 06:00 hl. Conforme pasa el tiempo y hacia las 10:00 hl, la ICU se desplaza al oeste y el área urbana empieza a mostrar un enfriamiento que se incrementa hasta las 16:00 hl. Desde las 18:00 hl se inicia un enfriamiento de los alrededores realizando la temperatura de las áreas urbanas, transformándose y teniendo su distribución a las 24:00 hl similar a la de las 02:00 hl. Es importante notar que hacia los centros cálidos en las diferentes horas, existe una zona de temperatura ligeramente más baja que a sus alrededores y que coincide con la estación meteorológica ubicada en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP). Este comportamiento puede ser debido, a que esa estación está rodeada por un área grande de vegetación que de alguna manera mitiga la alta temperatura, al menos en el área representativa de la mencionada estación. Por otro lado, hacia el año 2000 el centro cálido de la ZMCM coincidía cercanamente con el área comprendida dentro del circuito interior (Jáuregui y Heres Pulido, 2008). No obstante, en la actualidad el centro cálido se encuentra entre los sitios de las estaciones Cerro de la Estrella y Villa de las Flores, y entre San Agustín y ENEP Acatlán.

Durante el mes de febrero del 2009, el desarrollo de la ICU fue semejante al de enero aunque probablemente teniendo las mismas intensidades (figura 6.1.2a y b); no obstante, hacia las 24:00 hl gran parte del área urbana permanece siendo más fría que sus alrededores. Así sucesivamente, hasta que en el mes de mayo la distribución de la ICU se

caracteriza por contener una isla fría que coincide con la estación del IMP y que se va incrementando hasta las 12:00 hl en que casi toda el área urbana es más fría que sus alrededores, volviendo como a partir de las 16:00 hasta las 24:00 hl. Paralelamente, la intensidad de la ICU también disminuye alcanzando la mayor temperatura al este de la estación de La Merced (figura 6.1.3a y b). Esto es probablemente debido a situaciones meteorológicas dominantes, que permiten la elevación de la radiación solar y con ello la transpiración de la vegetación urbana existente como ocurre en la estación IMP.

En junio, cuando ya la estación lluviosa se empieza a establecer, la evolución de la ICU es semejante a la de mayo con una isla fría en IMP y un sitio de alta temperatura al este de La Merced; la intensidad de la ICU en este periodo de tiempo no es tan agudo como lo es en enero y febrero debido probablemente a que la evapotranspiración de la precipitación pluvial contribuye a disminuir la temperatura del aire.

El centro de la ICU abarca el área que se encuentra entre las estaciones ENEP-Acatlán, Plateros, Cerro de la Estrella, San Agustín y Villa de las Flores (área más o menos comprendida entre Periférico, Circuito Interior, Oceanía y Circuito Exterior Mexiquense).

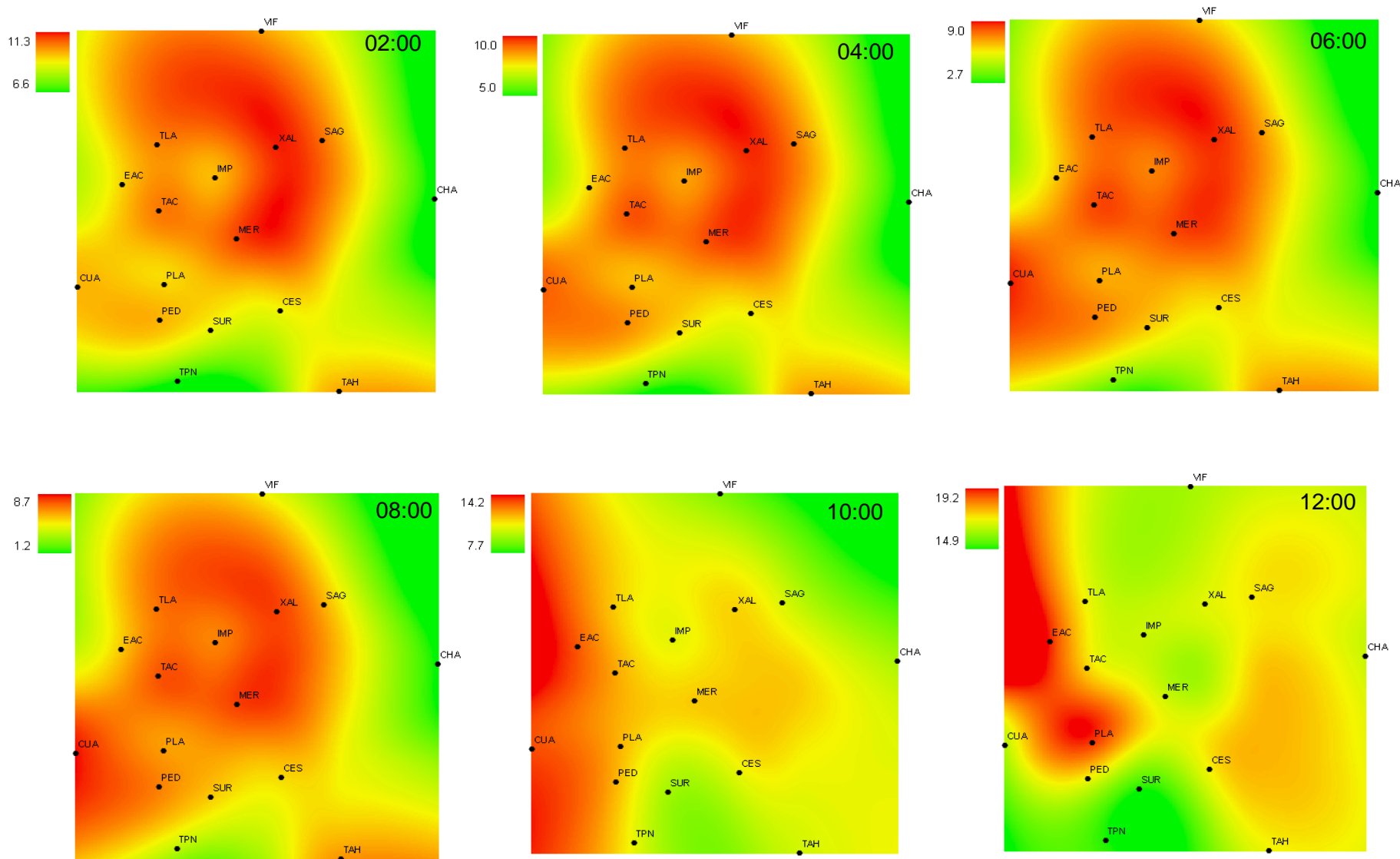


Figura 6.1.1a Evolución de la ICU en la ZMCM de las 02:00 a las 12:00 hl en el mes de enero de 2009 cada dos horas.

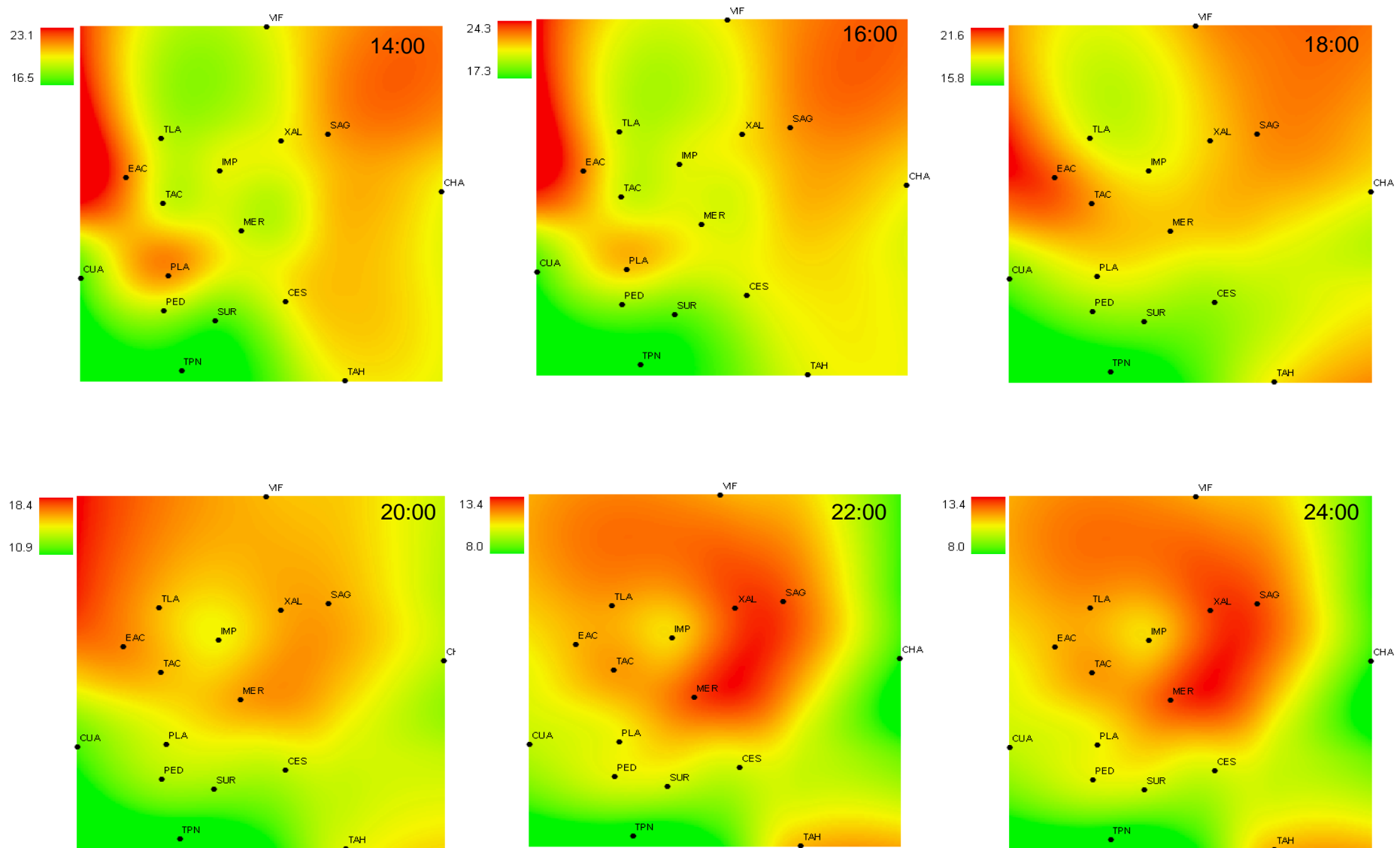


Figura 6.1.1b Evolución de la ICU en la ZMCM de las 14:00 a las 24:00 hl en el mes de enero de 2009 cada dos horas.

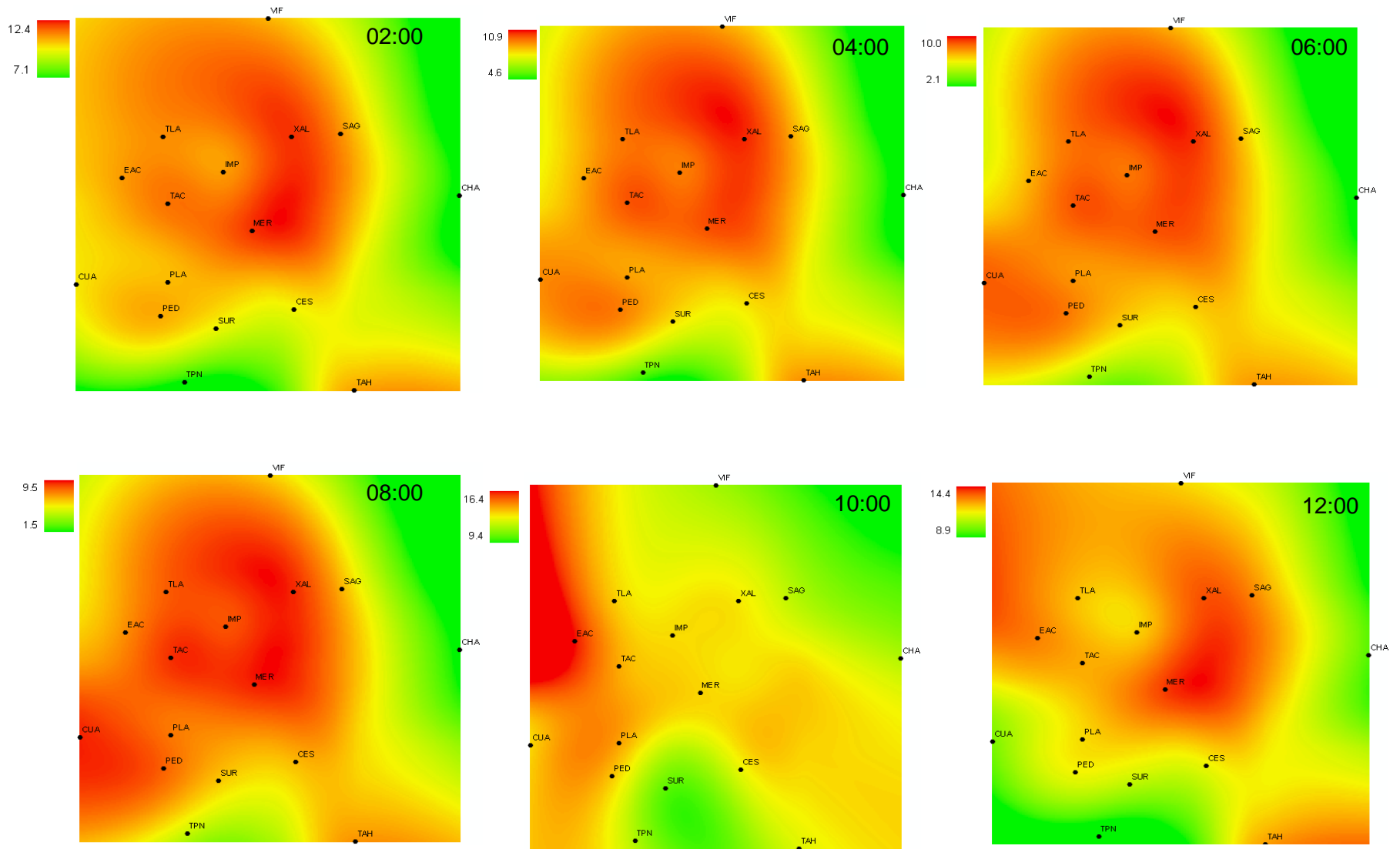


Figura 6.1.2a Evolución de la ICU en la ZMCM de las 02:00 a las 12:00 hl en el mes de febrero de 2009 cada dos horas.

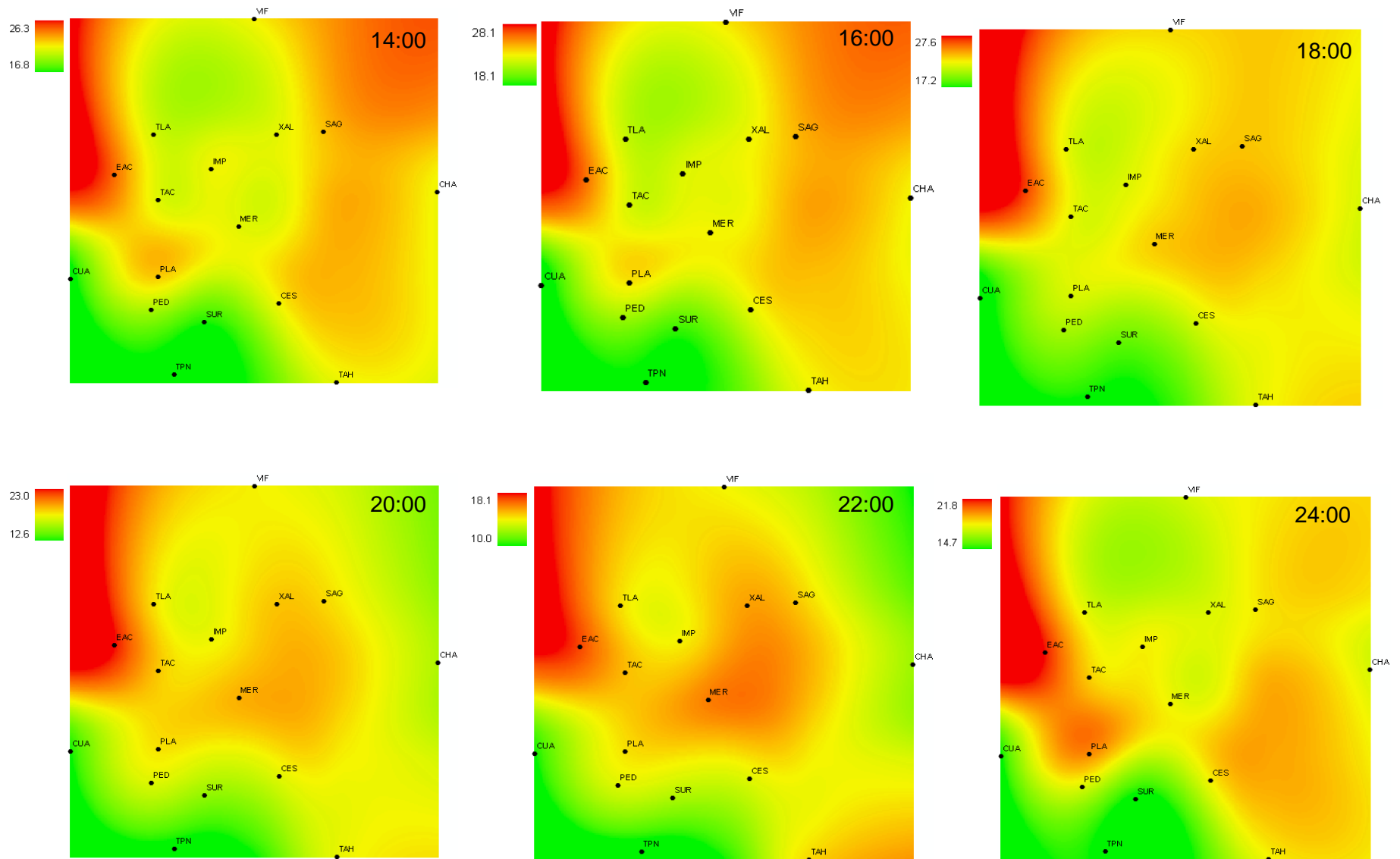


Figura 6.1.2b Evolución de la ICU en la ZMCM de las 14:00 a las 24:00 hl en el mes de febrero de 2009 cada dos horas.

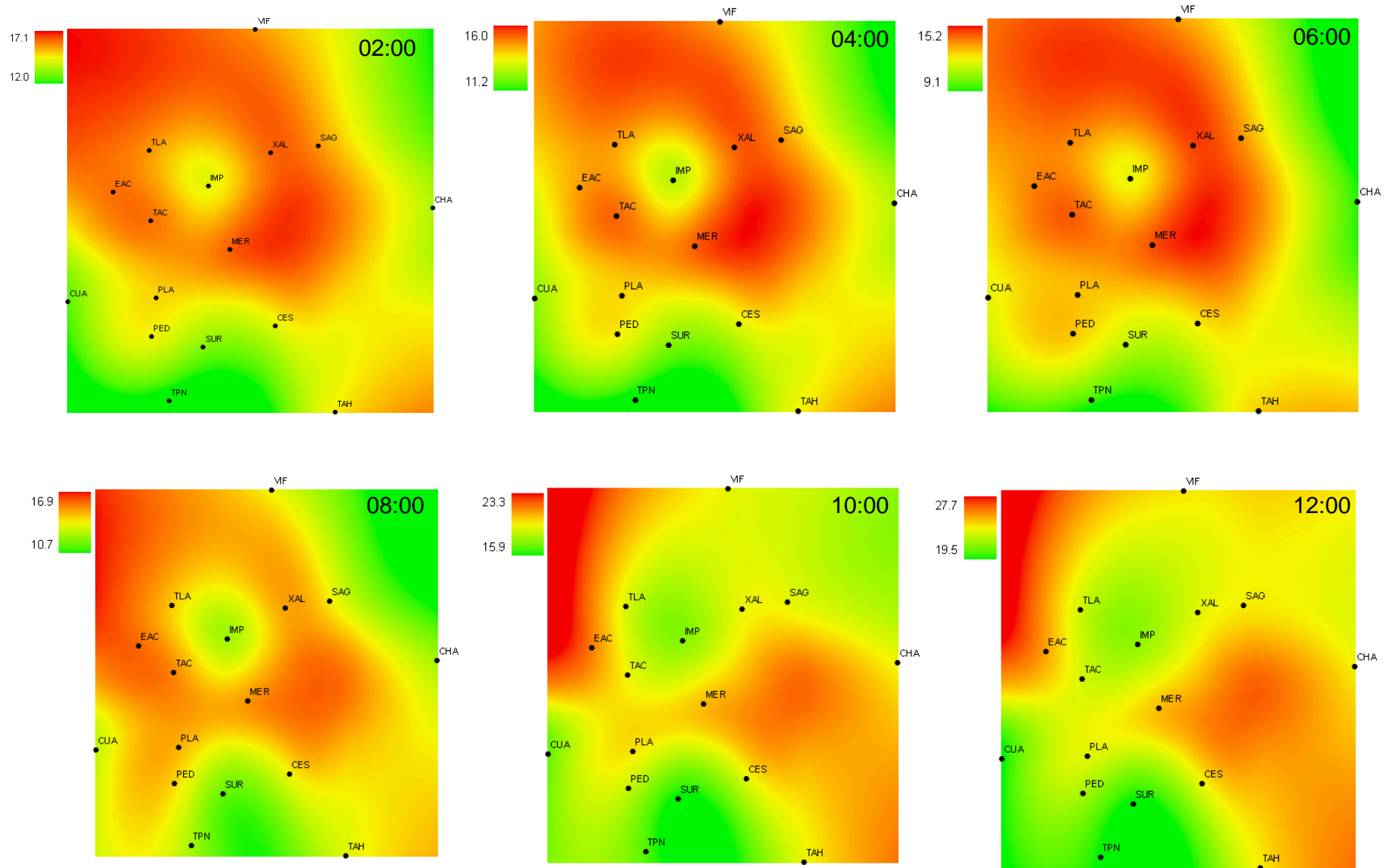


Figura 6.1.3a Evolución de la ICU en la ZMCM de las 02:00 a las 12:00 hl en el mes de mayo de 2009 cada dos horas.

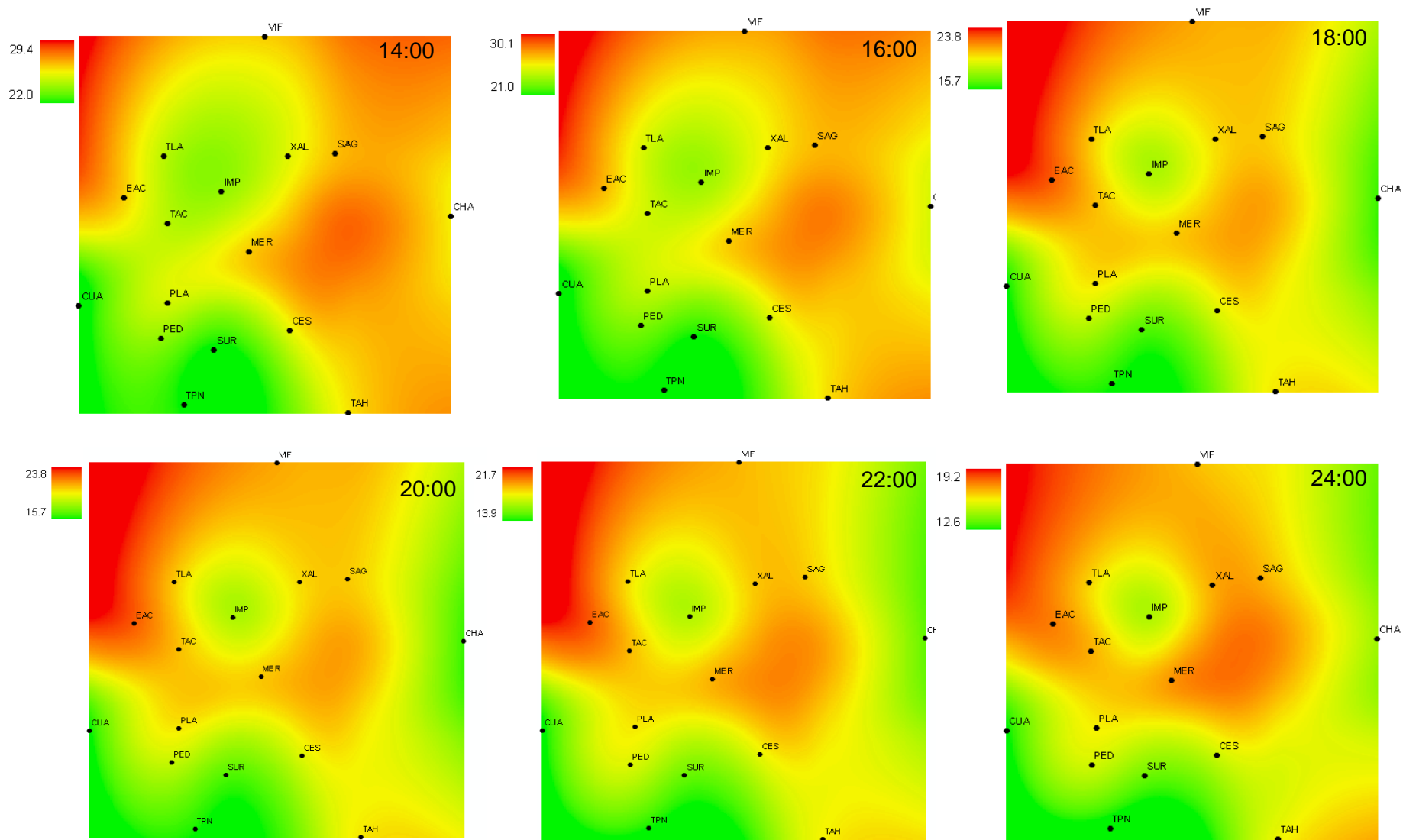


Figura 6.1.3b Evolución de la ICU en la ZMCM de las 14:00 a las 24:00 hl en el mes de mayo de 2009 cada dos horas.

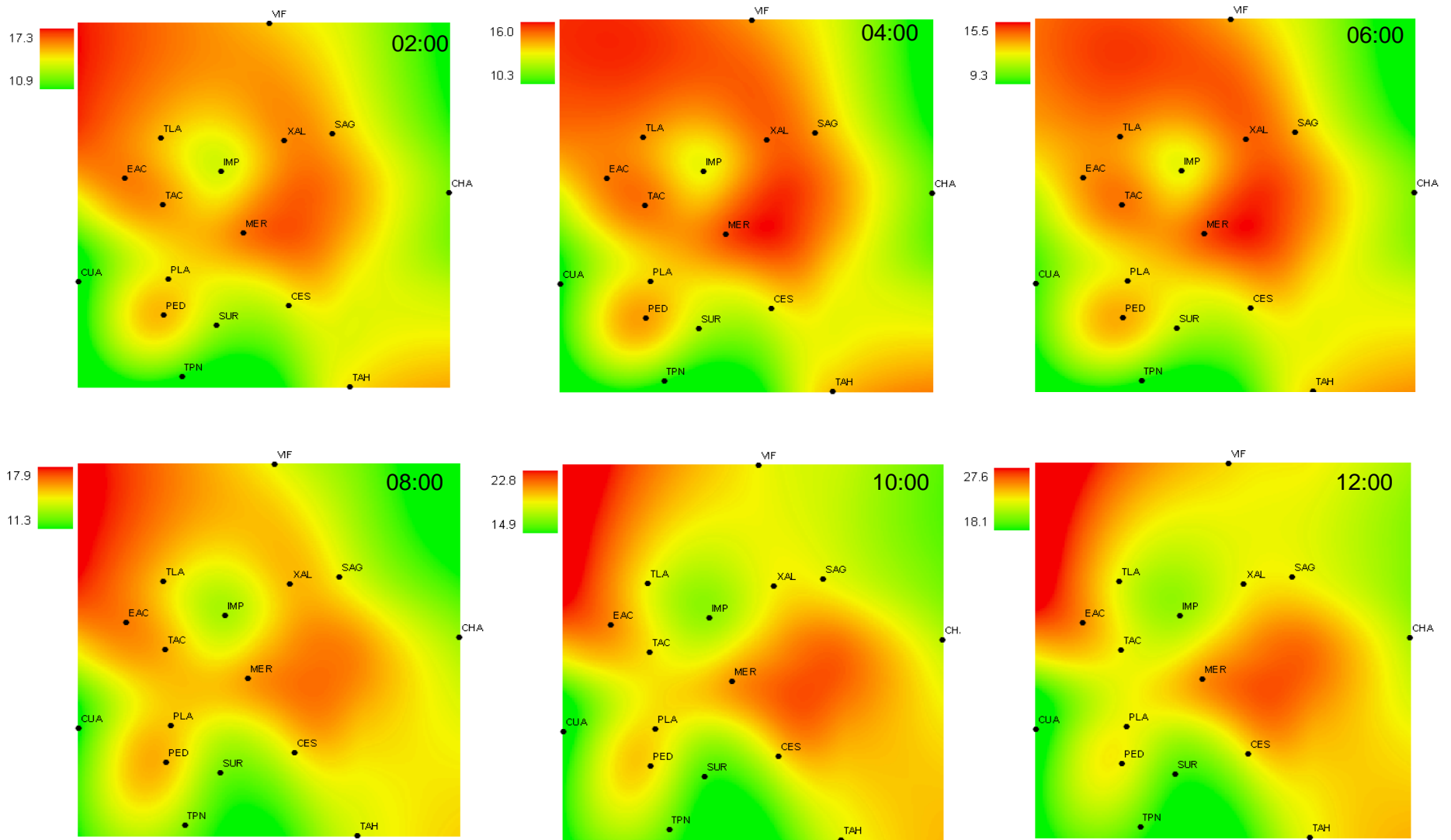


Figura 6.1.4a Evolución de la ICU en la ZMCM de las 02:00 a las 24:00 hl en el mes de junio de 2009 cada dos horas.

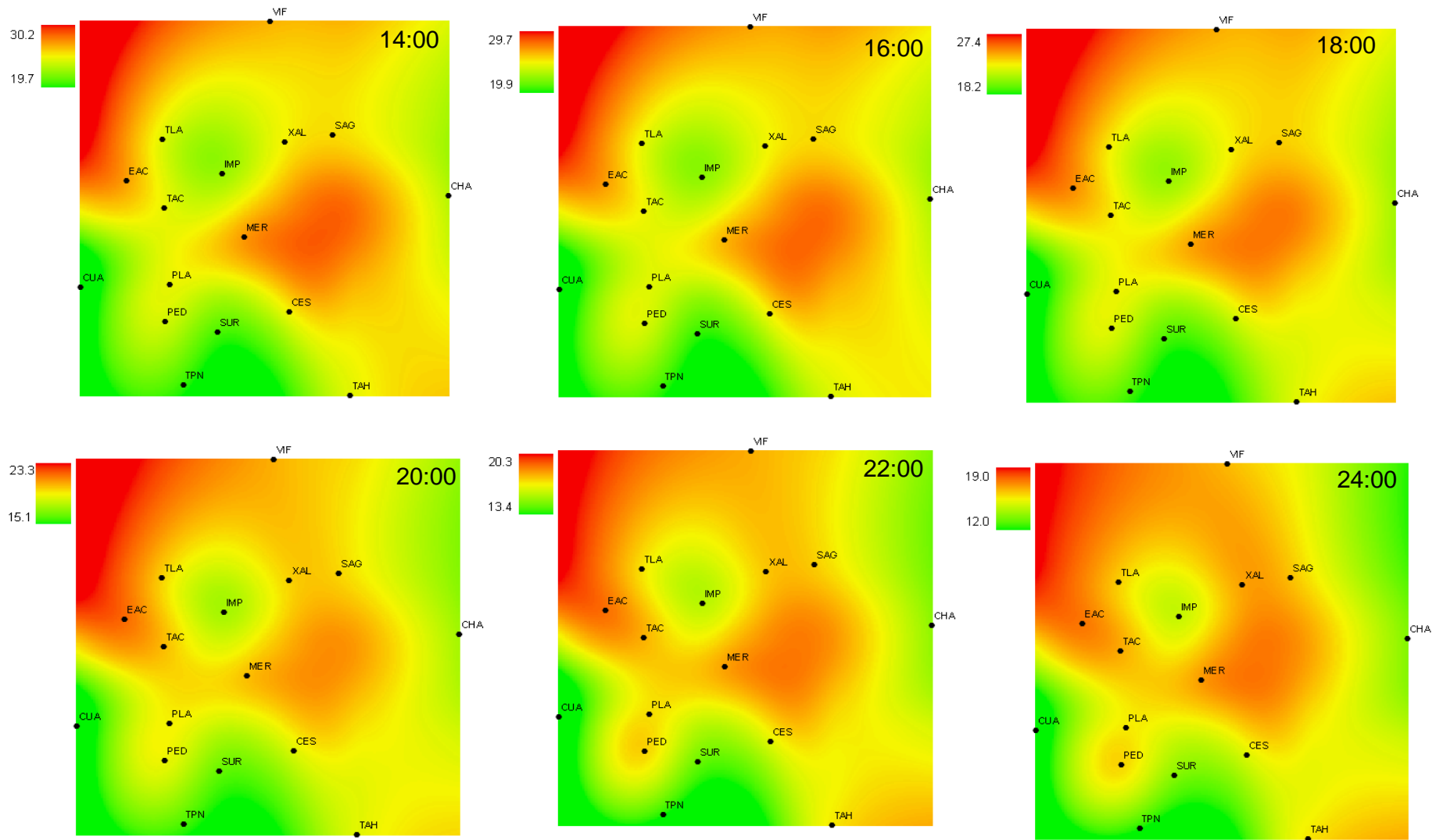


Figura 6.1.4b Evolución de la ICU en la ZMCM de las 14:00 a las 24:00 hl en el mes de junio de 2009 cada dos horas.

6.2 Intensidad de la isla de calor urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

En la figura 6.2.1 se muestran las diferencias entre cuatro estaciones urbanas (La Merced, Villa de las Flores, ENEP-Acatlán, Tlalpan) y una rural (Chapingo) (T_{U-R}) en el mes de enero del 2009. Contrario a lo que se puede esperar del comportamiento de la isla de calor urbana que es un fenómeno totalmente nocturno, al comparar las temperaturas entre las estaciones de La Merced y Chapingo, se observa que mayoritariamente la temperatura es más alta en el área de La Merced (figura 6.2.1a), que muestra que la isla de calor se establece tanto en el día como en la noche.

La intensidad del área de La Merced llega a ser hasta 7.1°C a las 04:00 hl del día 21 de enero. Sin embargo, hay periodos de baja intensidad que se encuentran entre los 0.09 y 1°C aproximadamente, alrededor de la 01:00 y 14:00 hl, respectivamente. Este comportamiento es muy semejante para las estaciones de Villa de las Flores y ENEP-Acatlán (figura 6.2.1b y d). Sin embargo, Tlalpan muestra la típica isla de calor urbana que es preponderante en las horas nocturnas en la que la temperatura no sobrepasa los 5°C . Es evidente que en algunos casos donde $T_{U-R} \gg 4^{\circ}\text{C}$ puede existir el efecto de algunos factores sinópticos o tipos de climas como nublados, lluviosos o ventosos.

En el mes de febrero, el comportamiento de la intensidad de la ICU es semejante a la del mes de enero, solo que en este caso el sitio de Villa de las Flores es la que presenta el fenómeno típico de la ICU, mientras que las otras tres: Tlalpan, La Merced y ENEP-Acatlán en las que la ICU predomina durante todo el día. La T_{U-R} del área de La Merced llega a ser hasta de 8.0°C a las 6:00 hl del día 25 y de 8.5°C a las 6:00 hl del día 5. No obstante, hay periodos de baja intensidad que se encuentran entre los 0.04 y 0.18°C , aproximadamente (figura 6.2.2).

Al comparar las temperaturas entre las estaciones de Villa de las Flores y Chapingo, se observa que mayoritariamente la temperatura es más alta en el área de Villa de las Flores que en la de Chapingo, como se puede ver en la figura 6.2.2, que muestra que la isla de calor se establece tanto en el día pero sobre todo en la noche. La intensidad del área de

Villa de las Flores llega a ser hasta 6.13°C a las 6:00 h del día 18 del mes de febrero. No obstante, hay periodos de baja intensidad que se encuentran entre los 0.04 y 0.18°C aproximadamente. Durante los meses de junio y julio la distribución de la diferencia de temperatura es similar a la de enero y febrero pero con diferencias de temperaturas mayores de hasta 12°C (figura 6.2.3 y 6.2.4).

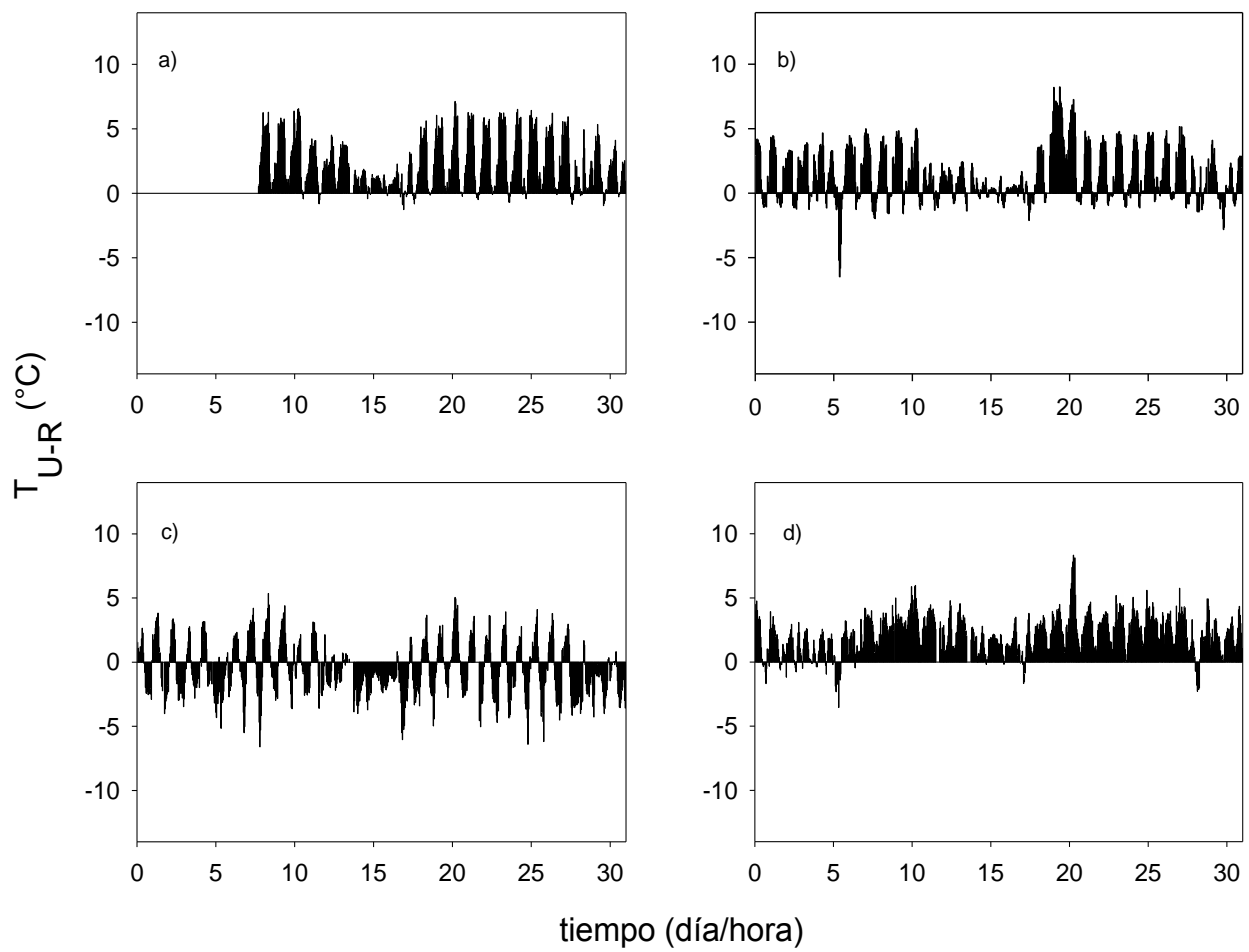


Figura 6.2.1 Diferencia de temperatura T_{U-R} (°C), en el mes de enero de 2009. a) La Merced-Chapingo, b) Villa de la Flores-Chapingo, c) Tlalpan-Chapingo, d) ENEP Acatlán-Chapingo.

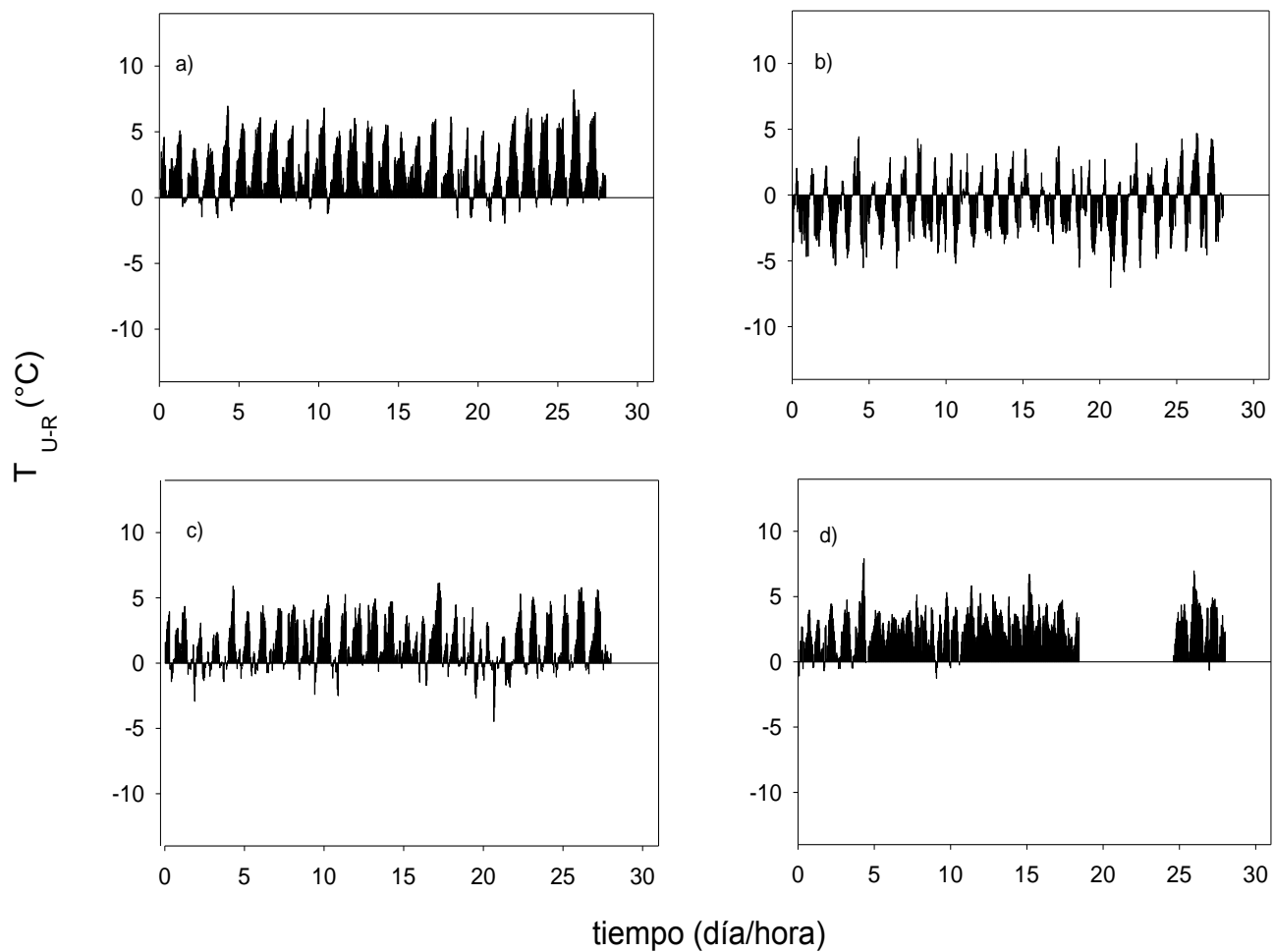


Figura 6.2.2 Diferencia de temperatura T_{U-R} ($^{\circ}\text{C}$), en el mes de febrero de 2009, a) La Merced-Chapingo, b) Villa de la Flores-Chapingo, c) Tlalpan-Chapingo, d) ENEP Acatlán-Chapingo.

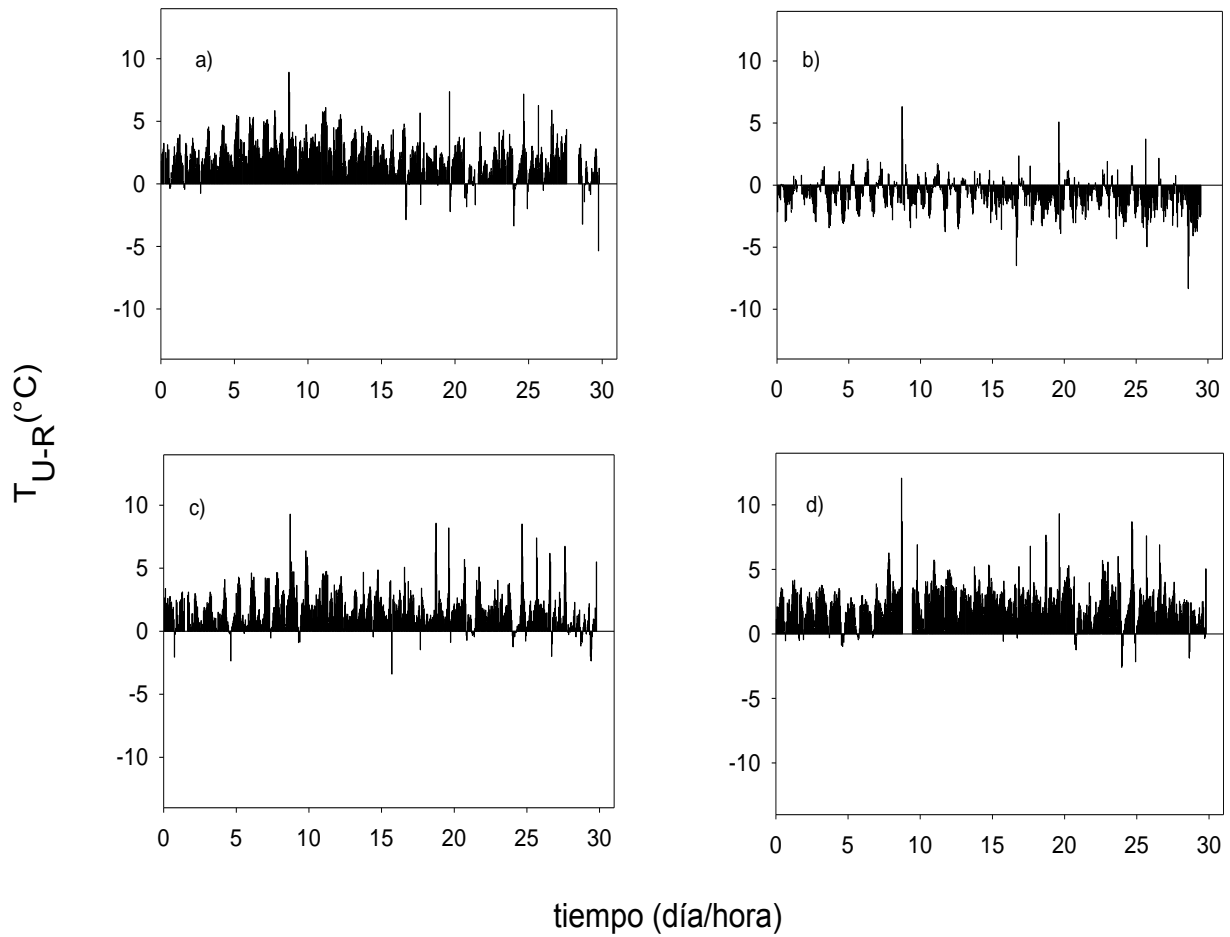


Figura 6.2.3 Diferencia de temperatura T_{U-R} (°C), en el mes de junio de 2009, a) La Merced-Chapingo, b) Villa de la Flores-Chapingo, c) Tlalpan-Chapingo, d) ENEP Acatlán-Chapingo.

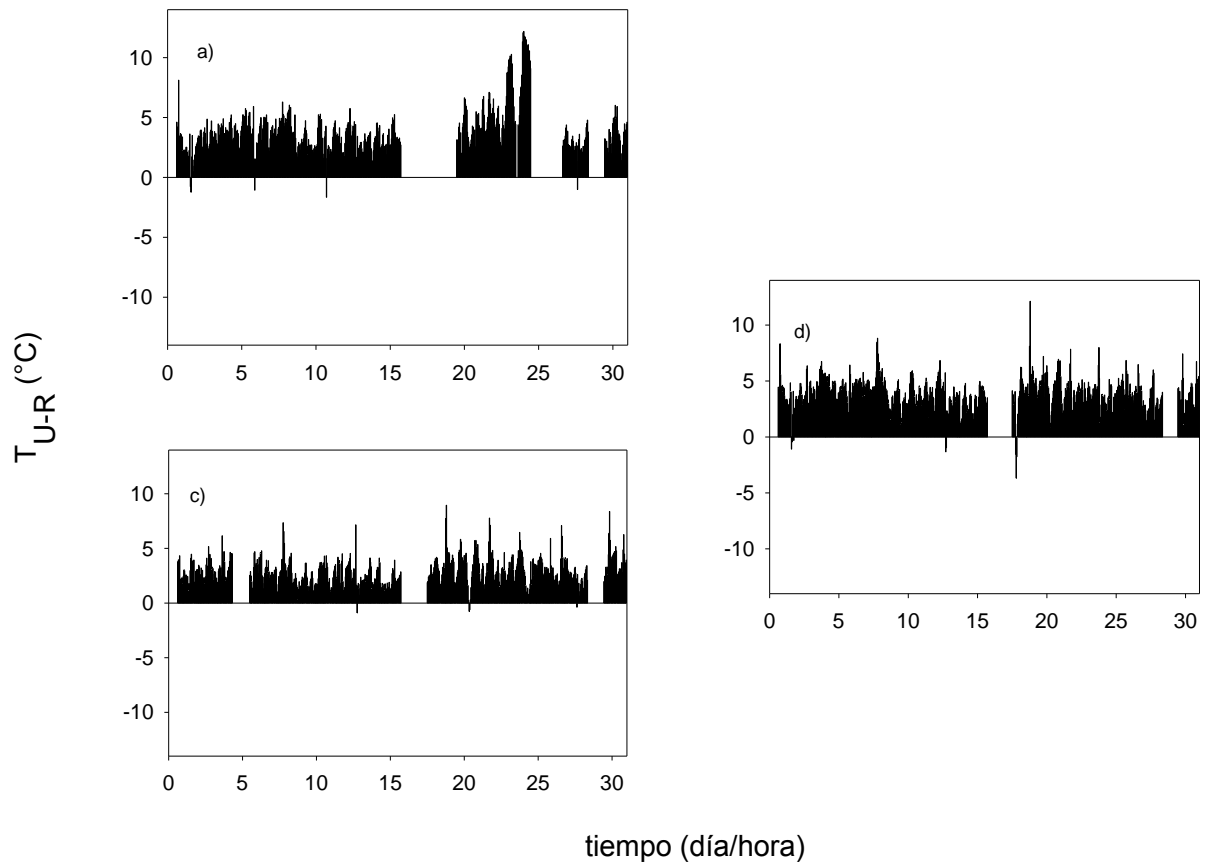


Figura 6.2.4 Diferencia de temperatura T_{U-R} ($^{\circ}\text{C}$), en el mes de julio de 2009, a) La Merced-Chapingo, b) Villa de la Flores-Chapingo (no hubo datos), c) Tlalpan-Chapingo, d) ENEP Acatlán-Chapingo.

En junio de 2010, las temperaturas entre las estaciones de Tlalpan y Chapingo, se observa que mayoritariamente la temperatura es más alta en Chapingo, como se puede ver en la figura 6.2.6, que muestra que la isla de calor se establece a lo largo del día y sobre todo en la noche. La intensidad del área de Chapingo llega a ser hasta 7.7°C a las 14:00 h del día 17 del mes de junio. No obstante, hay periodos de baja intensidad que se encuentran entre los 0.4 y 0.6°C aproximadamente, en 5:00 y 4:00 h, respectivamente.

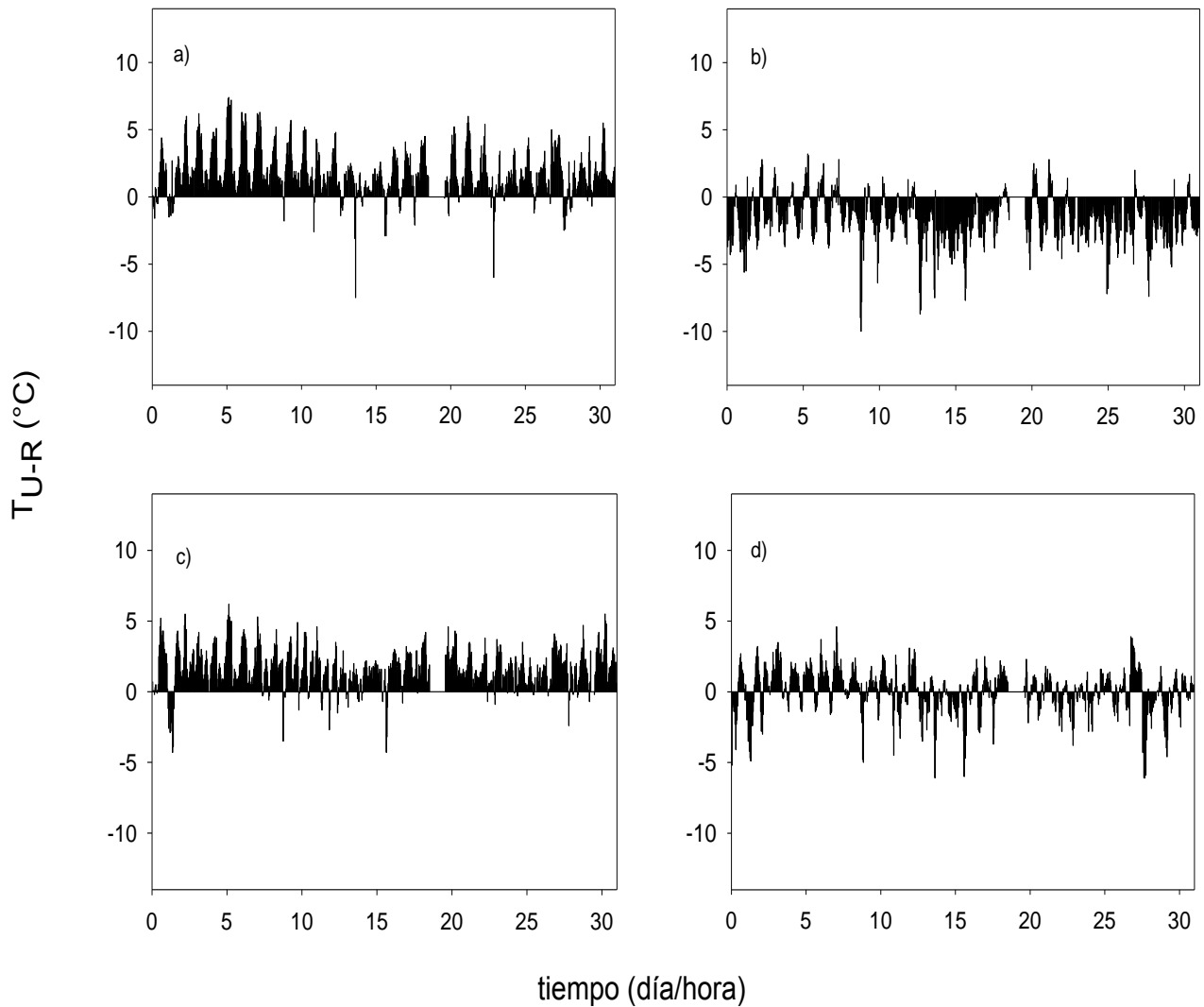


Figura 6.2.5 Diferencia de temperatura T_{U-R} ($^{\circ}\text{C}$), en el mes de mayo de 2010, a) La Merced-Chapingo, b) Villa de la Flores-Chapingo, c) Tlalpan-Chapingo, d) ENEP Acatlán-Chapingo.

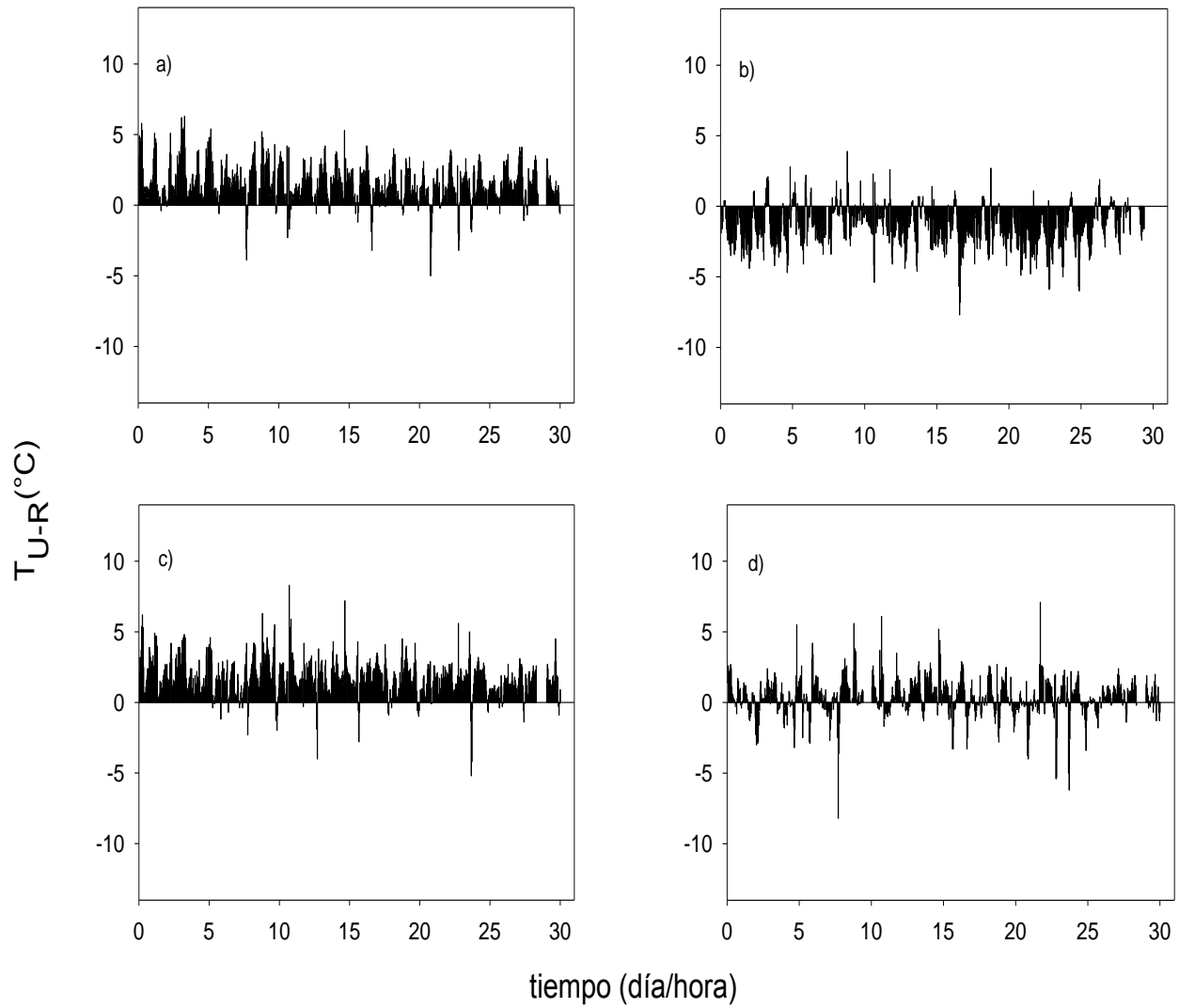


Figura 6.2.6 Diferencia de temperatura T_{U-R} (°C), en el mes de junio de 2010, a) La Merced-Chapingo, b) Villa de la Flores-Chapingo, c) Tlalpan-Chapingo, d) ENEP Acatlán-Chapingo.

6.3 Déficit de presión de vapor

La figura 6.3.1 muestra la distribución del DPV (Deficit de Presión de Vapor), para enero (café), febrero (azul), mayo (rojo) y junio (verde). Se tomaron en cuenta la hora en donde se encontró la mayor diferencia entre Chapingo y las demás estaciones, están fueron, para enero a las 06:00 hl, febrero a las 24:00 hl, junio a las 17:00 hl y julio a las 24:00 hl. En donde para enero se encontró que la mayor diferencia es de 8.33 °C el día 21, entre Chapingo y ENEP Acatlán; para el mes de febrero la mayor diferencia fue de 8.2 °C entre La Merced y Chapingo para el día 26; en el mes de junio la diferencia fue 12.1 °C entre ENEP Acatlán y Chapingo en el día 9 y para julio la diferencia que se encontró fue de 12.2 entre ENEP Acatlán y Chapingo para el día 24.

Como se puede observar en la figura 6.3.1, en los meses fríos y secos, se registra un DPV menor, teniendo en enero alrededor de 3 y 4 Pa y para febrero entre los 6 y 8 Pa; sin embargo para los meses calidos el DPV sobrepasa los 15 Pa. No obstante, en julio el DPV es menor que en junio, esto se debe a que julio es más húmedo ya que las lluvias han empezado a establecerse, con ello existe una menor demanda evaporativa para el área que cubre la estación Villa de las Flores. En ENEP Acatlán y La Merced, se tiene más demanda para esas fechas seguramente por ser más calido.

El centro de la ICU abarca el área que se encuentra entre las estaciones ENEP-Acatlán, Vila de las Flores, San Agustín, Cerro de la Estrella y Plateros (área más o menos comprendida entre Periférico, Circuito Exterior Mexiquense, Circuito Interior y Oceanía).

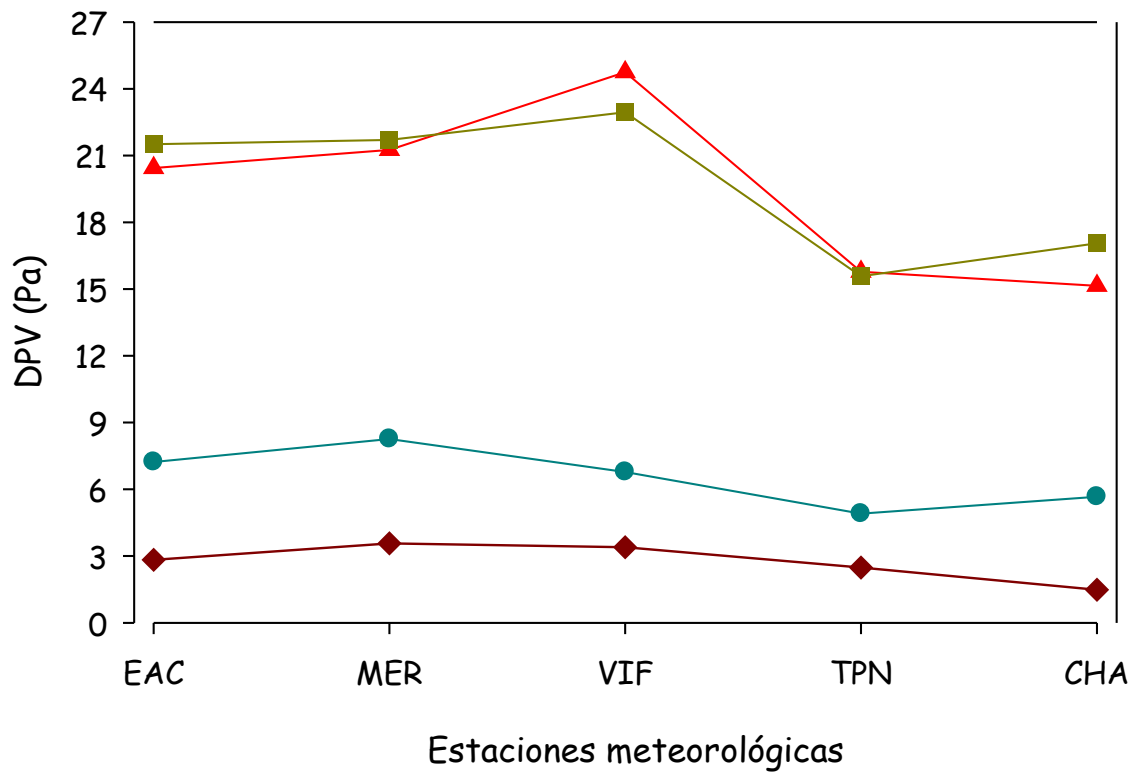


Figura 6.3.1 Déficit de presión de vapor (DPV) en cinco estaciones seleccionadas en el mes de enero (línea café), febrero (línea azul), junio (línea roja) y julio (línea verde) del 2009. EAC = ENEP Acatlán, MER = La Merced, VIF = Villa de las Flores, TPN = Tlalpan y CHA = Chapingo.

6.4 Determinación de Polución Térmica

La polución térmica se definió como todas aquellas temperaturas fisiológicas equivalentes por arriba de 23 °C. Como se muestra en la figura 6.4.1, en enero y febrero las PETs se encuentran por debajo del límite superior, pero la mayor parte del día se tienen valores de estrés por frío a excepción del periodo entre las 12:00 y 16:00 h en que es más confortable (PET > 18 °C). Para mayo y junio, el estrés por frío se presenta de las 2:00 a las 8:00 h y de las 18:00 a las 24:00 h, mientras que el estrés por calor se presenta después de las 10:00 hasta las 17:00 h, así que en esos periodos se tendría una situación de polución térmica y precisamente es en este tenor donde se trataría de mitigar la isla de calor urbana mediante el enfriamiento producido por la evaporación de agua dada por la

transpiración de las plantas. De esta manera, no solamente se reduciría la temperatura del aire sino que también se humedecería teniendo un impacto directo en PET.

La definición de la PET, como la respuesta termofisiológica (tanto como de temperatura corporal y temperatura de la piel) (Höppe, 1999), es una función en la que son necesarios datos referentes a las personas (altura, peso, sexo, actividad física, vestuario) y las condiciones meteorológicas, así como la localización de la persona en el sitio de estudio en un momento dado. En los cálculos para la determinación de la PET se utilizó el algoritmo descrito por Matzarakis et al. (1999) para una persona típica en un espacio abierto con una actividad física de 80 W m^{-2} (persona sedentaria) y vestida normalmente (0.9 Clo). Este algoritmo se aplicó únicamente en la estación de La Merced, debido a que la ICU permanece durante todo el día, y la estación ENEP Acatlán, tiene un comportamiento similar a la de La Merced en cuanto a las temperaturas altas, tendrá un comportamiento similar de la PET. Por lo tanto Tlalpan, tiene un comportamiento al de La Merced, con la diferencia de que en Tlalpan la PET sería ligeramente mas baja.

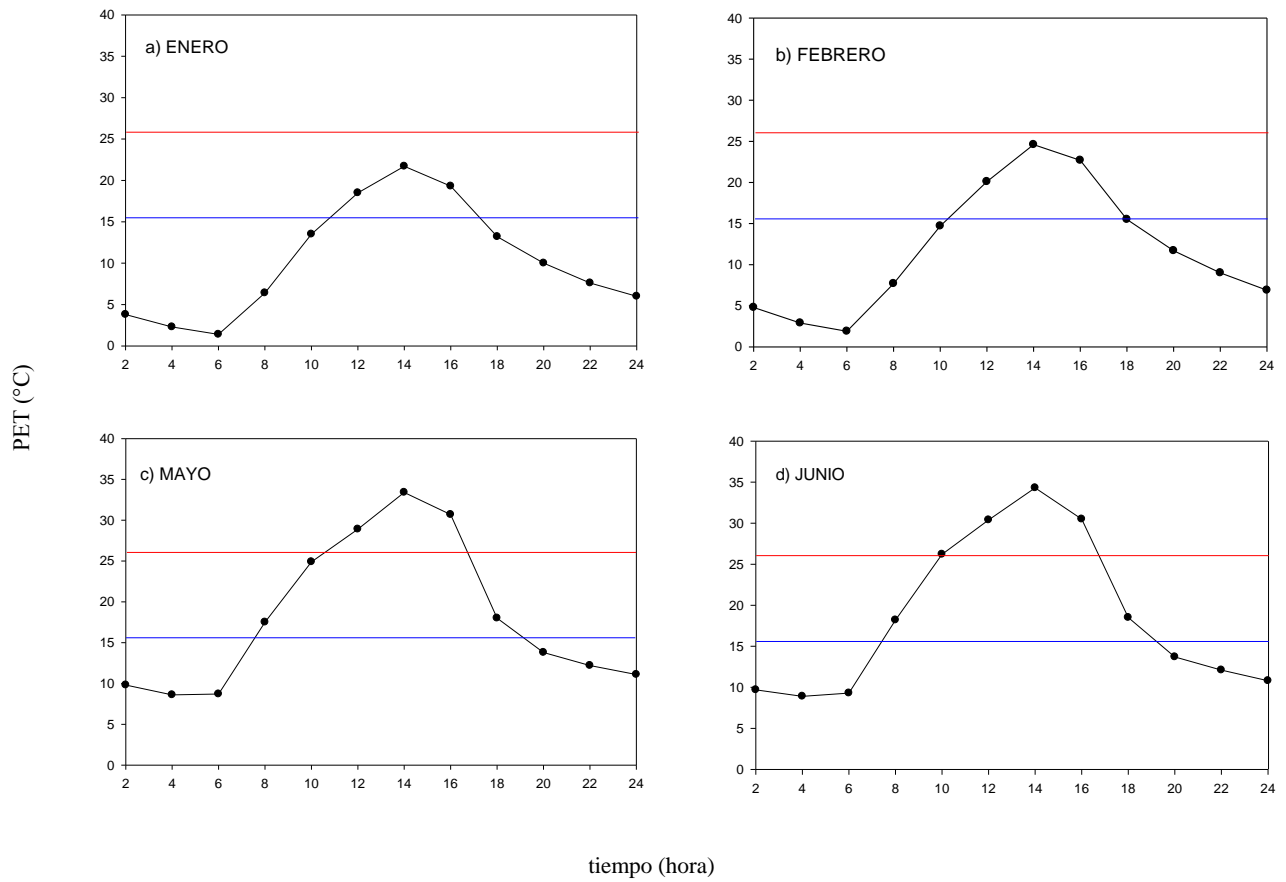


Figura 6.4.1 Índice de Confort Térmico PET en a) enero, b) febrero, c) mayo y d) junio en el año 2009 para la estación de La Merced.

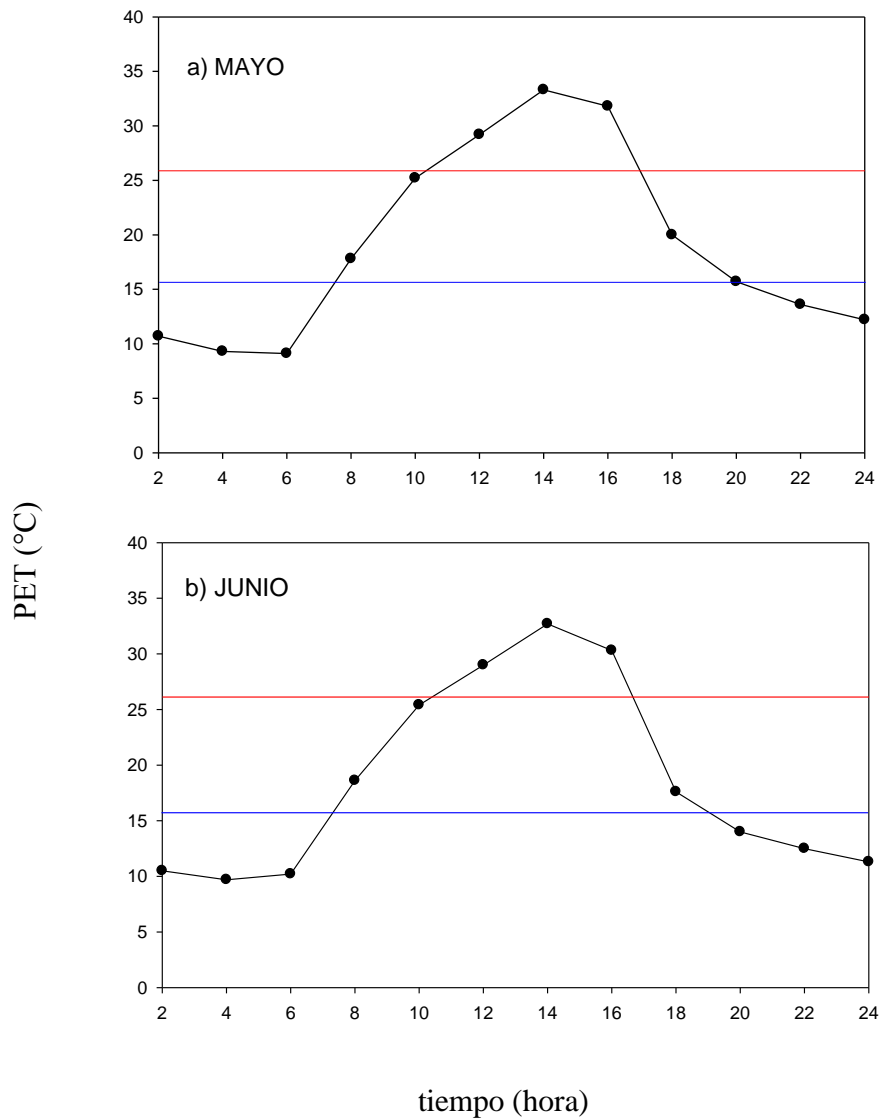


Figura 6.4.2 Índice de Confort Térmico en a) mayo y b) junio el año 2010, para la estación de La Merced.

6.5 Mitigación de la Isla de Calor Urbana

Como se menciona anteriormente, la energía destinada a climatizar esos elementos urbanos representa una retroalimentación que resalta el efecto de isla de calor. Por ello es indispensable en la planeación urbana considerar muy formalmente la mitigación de la isla de calor mediante la ubicación adecuada de los diferentes elementos urbanos. Así al mitigar la isla térmica no solo se ganará en ahorro de energía, sino que indirectamente se

disminuirá la cantidad de gases invernadero depositados en la atmósfera y con ello un menor calentamiento global.

Relación entre el flujo de calor sensible y la temperatura del aire

En la figura 6.5.1 se muestra una regresión simple entre la temperatura del aire y el flujo de calor sensible. Es imperioso notar, que el ajuste de la ecuación se realizó con los flujos de calor sensible ocurridos dos horas antes que las temperaturas en la que se obtuvo el mejor coeficiente de determinación (R^2) con lo que se observa que hay un retraso de Q_H en la temperatura del aire debido probablemente al tiempo que tardan los medios disipativos en incrementarse al desarrollarse los movimientos turbulentos. Con esta relación se será capaz de simular la temperatura del aire como resultado de la alteración del balance de energía, al incrementar el flujo de calor latente Q_E .

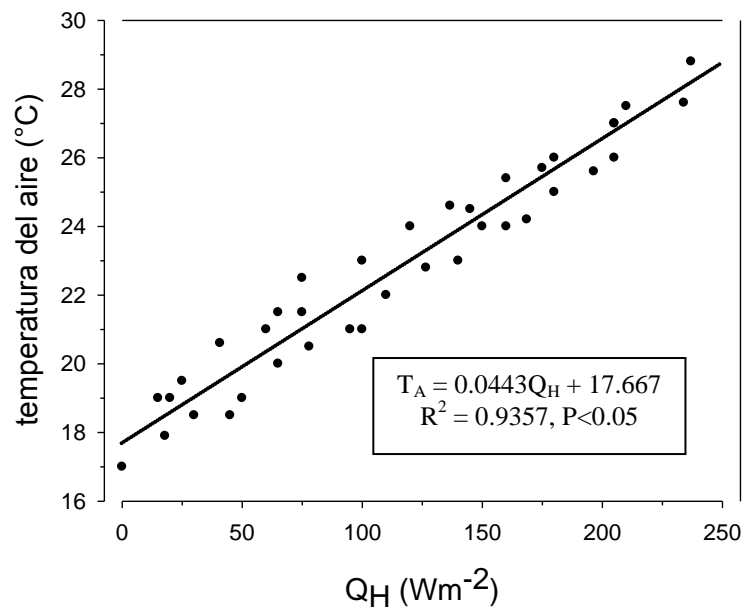


Figura 6.5.1. Relación entre el flujo de calor sensible (Q_H) y la temperatura del aire (T_A) en sitios de diferente uso del suelo en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Transpiración de dos sistemas arbolados

En la figura 6.5.2 se presenta la transpiración de dos sistemas arbolados semejantes a parques urbanos, donde el sistema 1 está conformado por árboles nativos y caducifolios y el 2 por árboles de rápido crecimiento. La transpiración se empieza a establecer temprano por la mañana hasta alcanzar su máximo valor hacia las 13:00 hl en ambos sistemas, para volver a disminuir y ser casi nula hacia las 18:00 hl. Como se puede observar el sistema 1 transpira menos que el sistema 2 alcanzando la máxima diferencia hacia las 14:00 hl con $0.17 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Un efecto importante es el que la transpiración sigue un patrón similar al de la radiación solar, así que a la hora de mayor incidencia de radiación se tendrá la mayor transpiración, aunque el efecto en la temperatura del aire sea dos horas después.

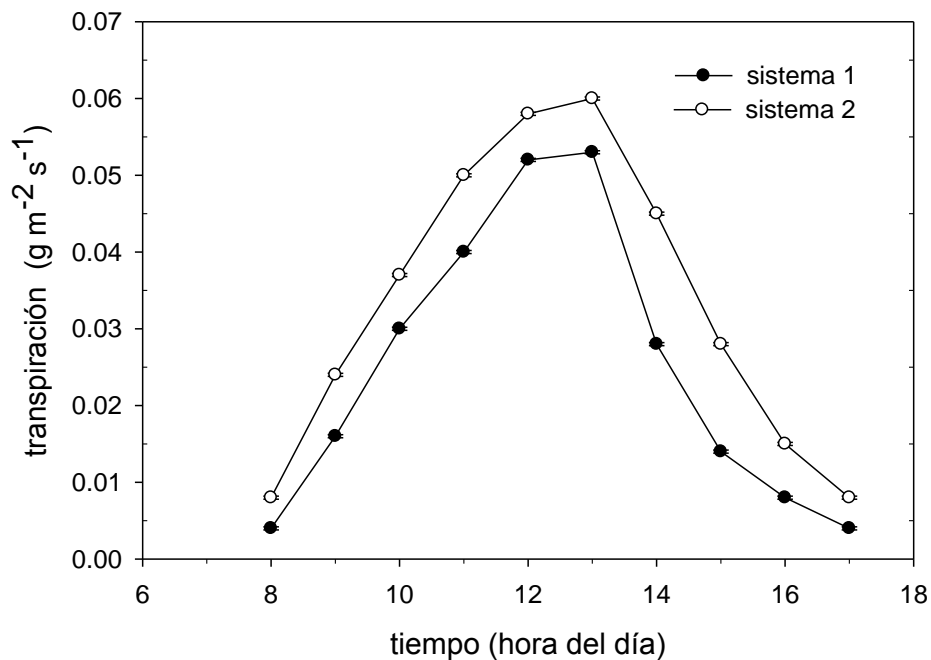


Figura 6.5.2 Transpiración en dos sistemas arbolados semejantes a los parques urbanos.

En la tabla 6.5.2 se muestran los diferentes valores del balance de energía de los dos sistemas arbolados y de un área totalmente urbana. Es evidente que el flujo de calor latente es mucho mayor en los dos sistemas arbolados que en el área urbana lo que

conlleva a una reducción del flujo de calor sensible y a una posible disminución de la temperatura del aire no sólo en los sistemas arbolados sino también en sus alrededores. El cociente Q_H/Q_E o razón de Bowen indica cómo es el flujo de calor sensible respecto del de calor latente y en los sistemas arbolados son menores de 1. Este valor entre más bajo sea, significa que el área es menos urbana y viceversa.

Tabla 6.5.1. Resumen del balance de energía cuando $Q_N > 0$ en dos sistemas arbolados semejantes a parques urbanos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Los valores son la media horaria de los flujos en $W m^{-2}$.

	Sistema 1	Sistema 2	Area urbanizada
Q_N	398	344	417
Q_E	213	248	96
Q_H	152	70	210.5
Q_S	32	26	110.5
Q_H/Q_E	0.70	0.28	8.5
Q_E/Q_N	0.35	0.72	0.36
Q_H/Q_N	0.50	0.21	0.60
Q_S/Q_N	0.15	0.07	0.04

El enfriamiento o reducción de la temperatura del aire generado por estos dos sistemas serían aproximadamente de 2.6 °C por el sistema 1 y de 6.2 °C por el sistema 2. Mientras que las temperaturas serían de 24.4 °C y 20.8 °C en el sistema 1 y 2, respectivamente; en tanto que en el área urbana sería de 27.0 °C.

La figura 6.5.3 muestra los resultados de una simulación al alterar el flujo de calor sensible, vía incrementando el flujo de calor latente. En ella se puede notar una reducción aceptable en las temperaturas del aire con la implementación de los sistemas 1 y 2. Estos escenarios corresponden a dos días, uno en la época seca (Fig. 6.5.3 a, 26 mayo 2009) y otro en la época húmeda (Fig. 6.5.3 b, 8 de junio 2009) y en que la T_{U-R} fue la más alta (15:00 y

17:00 h), respectivamente). Para el día 26 el intervalo actual de temperatura fue de 24.3 a 34.4 °C, mientras que en las simulaciones estos intervalos fueron de 24.3 a 30.5 °C y de 18.5 a 32.0 °C ubicando los sistemas 1 y 2, respectivamente (Fig. 6.5.3 a, c, e). Mientras que en el día 8, el intervalo actual de temperatura fue de 25.3 a 34.8 °C y en las simulaciones fueron de 25.2 a 30.4 °C y de 19.7 a 32 °C con los sistemas 1 y 2, respectivamente (Fig. 6.5.3 b, d, f).

Aunque es indudable que hay una disminución general de la temperatura, es interesante notar que las distribuciones de la temperatura en el espacio presentan un patrón de tal manera que pareciese que la ICU se desplaza sobre todo a áreas rurales, como es el caso de Chapingo. Si eso fuese realmente así, lo que sugiere es que el área urbana es verdaderamente menos cálida que algunos de sus alrededores. Aparentemente, la mejor solución es utilizar el sistema 1 en el que el enfriamiento es mayor; no obstante, las temperaturas son muy extremas (13.5 y 12.3 °C, el 26 de mayo y el 8 de junio, respectivamente). Probablemente pueda existir un mejor arreglo entre el sistema 1 y el 2.

No obstante, el reducir el flujo de calor sensible implica un efecto directo en la evolución de la capa límite planetaria (Carson, 1973) o en la inversión térmica, produciendo una posible concentración mayor de contaminantes. Sin embargo, en un estudio reciente del nivel de condensación por ascenso con radiosondeos del aeropuerto internacional de la Ciudad de México se encontró que éste tiende a reducir su altura y que concuerda con la restauración del Lago de Texcoco (Bonifacio, 2011).

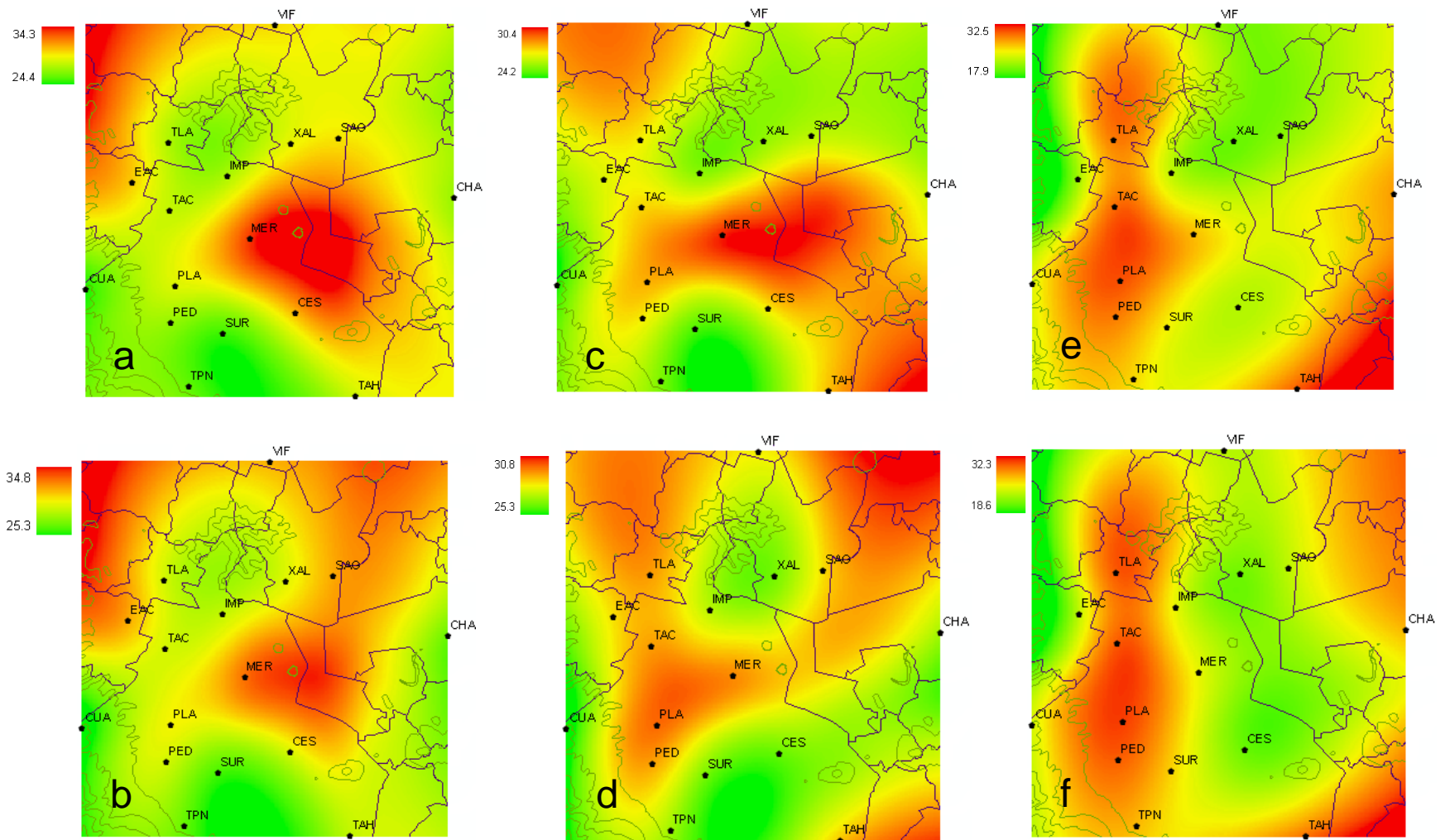


Figura 6.5.3 Simulaciones o escenarios de la mitigación de la isla de calor urbana de la ZMCM correspondientes a dos fechas con datos actuales en la época seca (a) (26 mayo 2009, 15:00 h) y en la época húmeda (b) (08 junio 2009, 17:00 h) en los sistemas 1 (c, d) y 2 (e, f).

7.

Conclusiones y recomendaciones

La Isla de Calor Urbana en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se distribuye en casi toda el área con un centro cálido que puede tener cambios dependiendo de la época del año y de la hora del día pero mayoritariamente se sitúa entre las estaciones de ENEP-Acatlán, Villa de las Flores, San Agustín, Cerro de la Estrella y Plateros principalmente en las horas nocturnas. No obstante, al contrario de la ICU tradicional, también se establece en las horas diurnas, con intensidades de hasta $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_{U-R}) (figura 6.2.3) en el mes de junio entre la estación ENEP- Acatlán y Chapingo el día 9 a las 17:00 hl.

Este comportamiento de la ICU en la ZMCM lleva a que sus habitantes puedan experimentar de seis a ocho horas la sensación térmica de estrés caluroso moderado a estrés caluroso fuerte, principalmente en la época cálida y húmeda con una PET de hasta $34.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figura 6.4.1). No obstante, en la época fría seca se presentan más horas de estrés por frío, de moderado a extremo con una PET de $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figura 6.4.1); sin embargo, en los meses de mayo y junio también se presenta un estrés frío moderado (PET mínima de $8\text{ }^{\circ}\text{C}$) con pocas horas durante el día. Con esta base y en función de la percepción humana por encima de ligeramente tibio (estrés caluroso ligero) se puede determinar la presencia de polución térmica.

Los sistemas arbolados semejantes a parques urbanos, demostraron una amplia potencialidad de mitigación de la isla de calor urbana en la ZMCM al reducir las temperaturas más altas de hasta $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por otro lado, debido a que la transpiración vegetal sigue casi el mismo patrón que la radiación solar y la temperatura del aire, el enfriamiento producido no es constante durante el día, sino que presenta un patrón semejante al de la radiación solar (mayor transpiración y por lo tanto mayor enfriamiento a la hora de la máxima radiación solar y temperatura). Con ello se demuestra que estos sistemas tienen mayor poder de enfriamiento que el área urbana, lo que nos lleva a la conclusión que el método de mitigación de la ICU puede ser muy eficiente solamente con el incremento de la vegetación urbana.

Con este tipo de estudios se pueden determinar los niveles máximos de temperatura del aire que no afecten la productividad humana y con ello sugerir los sistemas arbolados o de vegetación en general para mitigar el efecto que produce la ICU en el confort térmico humano; ya que la comodidad térmica generada artificialmente (sistemas de acondicionamiento de aire) aumenta los costos energéticos y retroalimenta la ICU.

También es posible generar normas y probablemente leyes que no permitan el incremento significativo de la ICU dando pautas para el establecimiento de normas mexicanas para la medición, análisis, valores máximos permisibles y mitigación o atenuación de este tipo de contaminación.

La información generada puede ser muy útil en la planeación de las nuevas áreas de expansión de la ZMCM.

Las estaciones de la REDMET fueron de gran utilidad para el desarrollo de esta investigación; sin embargo, la densidad de ésta no es adecuada para este tipo de estudios teniendo muy poca precisión en la distribución e intensidad de la ICU. Probablemente se podrá obtener una mejor precisión examinando y/o analizando imágenes de satélite. Por ejemplo, las imágenes provenientes de los satélites SPOT tienen un campo de observación de 60x60 km y su multiresolución ofrece una gama completa de imágenes de 2.5 a 20 m; estas imágenes ofrecen el conocimiento para el control, la previsión y la gestión de los recursos y actividades humanas en el planeta, a parte de que son sencillas de procesar y se asocian fácilmente con otros datos geográficos, que nos conduce a la generación de información útil. Las imágenes Landsat por otro lado, tienen una resolución de 30x30 m, y el periodo de revista es de 16 días, lo cual es factible para observar el uso del suelo a muy corto tiempo. Por otra parte, las imágenes AVHRR tienen un tamaño de píxel de 1x1 km con un ciclo de orbita de 9 días, por lo cual proporciona información del estado actual de la atmósfera. Todo esto nos lleva a que el método a emplear como son las imágenes de satélite para detectar la ICU en la ZMCM es factible y con esta precisión conocer su distribución actual con mayor precisión y como mitigarla a partir del estudio de su localización.

8.

Referencias

Alcoforado, M. J., 1992, *O clima da região de Lisboa. Contrastes e ritmos térmicos*, Centro de Estudos Geográficos, Lisboa.

Barradas, V.L. and J-Seres, R. (1988) *Los pulmones urbanos*. *Ciencia y Desarrollo* 78, 61–72.

Barradas, V.L. (1991) *Air temperature and humidity and human comfort index of some city parks of Mexico City*. *International Journal of Biometeorology* **35**, 24–28.

Barradas VL. (1998). *Measurements of latent heat flux in a small urban park in Mexico City*. Preprint: 23rd Conference on Agricultural and Forest Meteorology, 14th Conference on Biometeorology and Aerobiology and 2nd Urban Environment Symposium. American Meteorological Society. Albuquerque, New Mexico

Barradas, V.L., Tejeda-Martinez, A. y Jauregui, E. (1999) *Energy balance measurements in a suburban vegetated area in Mexico City*. *Atmospheric Environment* **33**, 4109–4113.

Barradas VL. (2000). *Energy balance and transpiration in an urban tree hedgerow in Mexico City*. *Urban Ecosystems* 4:55-67.

Basara J., Basara H., Illston B. y Crawford K. (2010). *The Impact of the Urban Heat Island During an Intense Heat Wave in Oklahoma City*. Hindawi Publishing Corporation *Advances in Meteorology*. Volume 2010, Article ID 230365, 10 pp.

Bell M., O'Neill M., Ranjit N., Borja-Aburto V., Cifuentes L. y Gouveia N. (2008). *Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: a case-crossover study in São Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico*. *International Journal of Epidemiology* 37: 796–804.

Bonacquisti V, Casale GR, Palmieri S, Siani Am. (2006) *A canopy layer model and its application to Rome*. Science of the Total Environment **1-3**: 1-13.

Bonifacio M. (2011). *Homogeneidad y análisis de tendencia del nivel de condensación por ascenso (NCA), en dos estaciones radiosondeo-viento*. Tesis de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas. Facultad de Instrumentación Electrónica y Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver.

Capelli de Steffens A, Piccolo MC, Campos de Ferreras A. (2005) *El Clima Urbano de Bahía Blanca*. Editorial Dunken, Argentina. 184 pp.

Cañizares M. del C. (1998). *Desarrollo Urbano y Problemática Ambiental de la Ciudad de Portallano (Ciudad Real)*. Universidad de Castilla-la Mancha. Ediciones de la Universidad de Castilla-la Mancha. 776pp.

Carson, D.J. (1973). *The development of a dry inversion-capped convectively unstable boundary layer*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 99: 450–467.

Ezcurra, E (1991). *De las chinampas a la megalópolis, el medio ambiente de la cuenca de México*. Fondo de Cultura Económica Serie Ciencia vol 91, México, D.F. México. 119 pp.

Ezcurra, E. y Mazari, M. (1996). *Are Megacities Viable? A Cautionary Tale from Mexico City*. Environment **38**: 6-35.

Gartland, L. (2008). *Heat Islands: Understanding and Mitigation Heat in Urban Areas*. Crownwell Press, United Kingdom. 192 pp.

Grimmond C.S. B, Oke TR, Spronken-Smith R, Jauregui E, Souch C, Newton T, King TS, Voogt J y Hubble M. (1996). Heat storage in urban areas. Preprint: 12th Conference on Biometeorology and Aerobiology, 76th American Meteorological Society Annual Meeting. American Meteorological Society. Atlanta GA.

Grimmond, C.S.B., T. R. Oke, (1999): *Heat Storage in Urban Areas: Local-Scale Observations and Evaluation of a Simple Model. J. Appl. Meteor.*, **38**, 922–940.

Höppe, P. (1999). *The physiological equivalent temperature-a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International Journal of Biometeorology*. 43(2): 71-75.

Jáuregui, E. (1975) *Microclima del Bosque de Chapultepec*. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., Mexico.

Jáuregui, E. (1986). *The urban climate of Mexico City*. In: Oke,T.R. (Ed.), *Urban Climatology and its Application with Special Regard to Tropical Areas*, 63-86. WMO no. 652, World Meteorological Organization, Geneva.

Jáuregui E. (1996). *Heat island development in Mexico City. Atmospheric Environment* 31:3821- 3831

Jáuregui, E. (2000). *1. Textos Monográficos: 4. Urbanización. El clima de la Ciudad de México*. Plaza y Valdés Editores. Temas Selectos de Geografía de México. 131 pp.

Jáuregui E. y Heres Pulido M. (2008). *El clima/bioclima de un parque periurbano de la Ciudad de México*. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611, Núm. 67, 2008, pp. 101-112

K. E. Kunkel, S. A. Changnon, B. C. Reinke, and R. W. Arritt, *The July 1995 heat wave in the midwest: a climatic perspective and critical weather factors*. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 77, no. 7, pp. 1507–1518, 1996.

Landsberg, H.E. (1981). *The Urban Climate, International Geophysics Series Volume 28*. Academic Press, Inc., Londres. 277 pp: 83-100.

Matzarakis, A., Mayer, H., (1996). *Another kind of environmental stress: Thermal stress. WHO collaborating centre for Air Quality Management and Air pollution Control. NEWSLETTERS 18, 7–10.*

Matzarakis A, Rutz F, Mayer H. (2010). Modelling radiation fluxes in a simple and complex environments: basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology 54: 131-139.*

Oke, T.R. (1987). *Boundary layer climates.* Routledge, London.

Patz, J., Campbell-Lendrum D, Holloway T. y Foley J (2005). *Impact of regional climate change on human health. Nature 438, 310-317.*

PEMEX (1986) *Evaluación de las Áreas Arboladas de la Delegación Azcapotzalco.* Subdirección de Planeación y Coordinación, Gerencia de Coordinación y Control de Protección ambiental, Petróleos Mexicanos. México, D.F., México.

Ramos G. (1998) *Simulación de escenarios de ahorro y uso eficiente de energía con medidas de control pasivo.* Revista FIDE, año 7, núm. 28, 25 Pp,

Sailor, D.J. (1995). *Simulated Urban Climate Response to Modifications in Surface Albedo and Vegetative Cover.* *Journal of Applied Meteorology 34: 1694-1704.*

Seoánez, M. (2002). *Tratado de la Contaminación Atmosférica: Problemas, Tratamiento y Gestión, Colección Ingeniería del Medio Ambiente.* Ediciones Mundi-Prensa, España. 1111 pp.

Sadahiro, Y. (2008). *Spatial Data Infrastructure for Urban Regeneration.* Springer, Japan. 166 pp.

Santamouris, M. (2010). *Advances in Building Energy Research (aber): Cool Materials and Cool Roofs, Volumen 4.* Earthscan Press, United States of America. 309 pp: 206-266.

Solecki W, Rosenzweig C, Parshall L, Gaffin S, Lynn B, Goldberg B, Cox J, Hodges S (2005). *Mitigation of the Heat Island Effect in Urban New Jersey. Environmental Hazards* **6**: 39-49.

Spronken-Smith, R. (1990) *Air temperature survey of urban parks in Tucson, Arizona. In Proceedings of the First International Symposium on Urban Climate, Air Pollution and Planning in Tropical Cities*. OMMAC-TRUCE, Guadalajara, Mexico.

Spronken-Smith, R. y Oke, T.R. (1998) *The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climate*. *International Journal of Remote Sensing* **19**, 2085–2104.

Wong Hien N, Chen Y. (2009). *Tropical Urban Heat Islands: Climate, buildings and greenery*. Taylor & Francis Editor, United States of America. 259 pp: 58-68.

Yoshino, M. (1975). *Climate in a small area: an introduction to local meteorology*. University of Tokyo Press. Japón. 549 pp.

Páginas web consultadas

1. - Moschida, A. *Japanese Experience of Technology and Policy for Urban Heat-Island Mitigating* .http://www.scholar.google.com/scholar?q=Japanese+Experience+of+Technology+and+Policy&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart, fecha de apoyo: 29 de marzo de 2011.

2.- <http://www.sma.df.gob.mx/corena/>. Fecha de apoyo: 14 de marzo de 2011.

3.- <http://www.inegi.org.mx>. Fecha de apoyo 29 de marzo de 2011.

ANEXO UNICO. Características físicas y biológicas de las especies con que se conformaron los sistemas arbolados 1 y 2 y con las que se podrán construir sistemas arbolados con una mayor biodiversidad.



Populus tremuloides

Salicáceas
ALAMILLO

Sombra: Media. Foliación: Caduca.
Crecimiento: Rápido. Longevidad: > 100 años.
Origen: Inducida (Norteamérica).
Tabla de crecimiento

AÑOS	5	10	20	Máx.
Altura en m	4	8	20	30
Φ de copa en m	3	6	10	12
Φ del tronco a 1.30 m en cm	10	35	50	80



Morus celtidifolia

Moráceas

MORERA, MORERA LLORONA

Sombra: Densa. Foliación: Caduca.

Crecimiento: Rápido. Longevidad: > de 30 años.

Origen: Nativa (México).

Tabla de crecimiento

AÑOS	5	10	20	Máx.
Altura en m	3	5	7	10
Φ de copa en m	2	3	5	7
Φ del tronco a 1.30 m en cm	8	15	25	50



Fraxinus uhdei

Oleáceas
FRESNO

Sinonimia *F. americana* var. *uhdei*.

Sombra: Media. Foliación: Caduca (invierno).

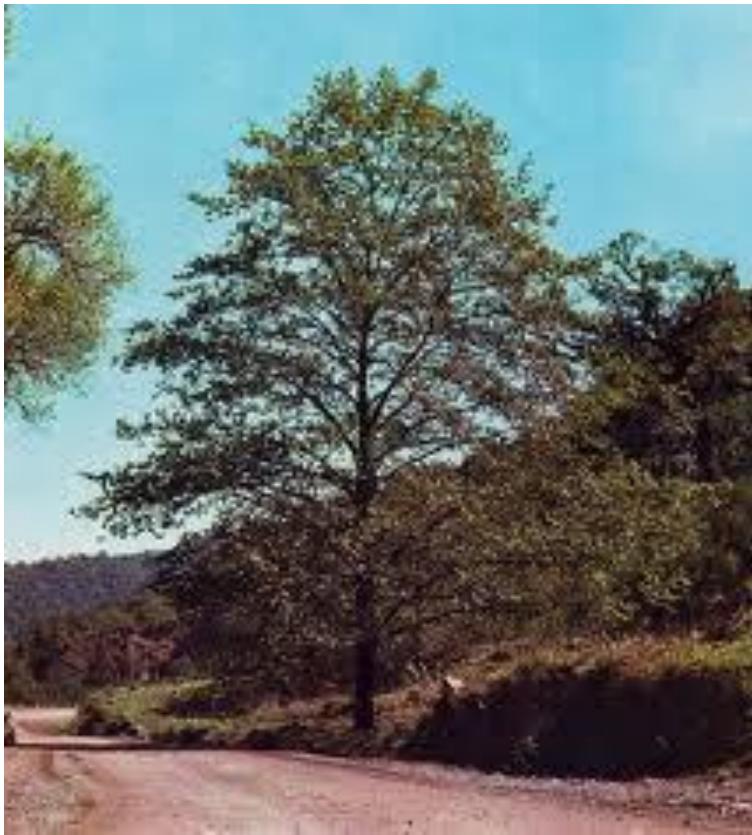
Crecimiento: Rápido. Longevidad: > de 100 años.

Origen: Nativa (América del Norte, Cuenca del Valle de México y varios estados de la República Mexicana).

Tabla de crecimiento

AÑOS	5	10	20	Máx.
Altura en m	4	5-6	15-18	35
Φ de copa en m	2.5	6	10	15
Φ del tronco a 1.30 m cm	15	25	50	> 2.50





Alnus acuminata

Betuláceas
AILE, ALISO

Sombra: Media. Foliación: Caduca (invierno).
Crecimiento: Rápido. Longevidad: > a 50 años.
Origen: Nativa (Norte de México hasta el sur del Distrito Federal, en el bosque mesófilo de montaña).

Tabla de crecimiento

AÑOS	5	10	20	Máx.
Altura en m	3	5	6	6-8
Φ de copa en m	2	7	8	8
Φ del tronco a 1.30 m en cm	10	30	50	> 80





Acer negundo

Aceráceas
NEGUNDO, ARCE, ACEZINTLE



Sombra: Media. Foliación: Caducifolia.
Crecimiento: Rápido. Longevidad: > de 80 años.
Origen: Nativa (Norte América, México).
Tabla de crecimiento

AÑOS	5	10	20	Máx.
Altura en m	3	6	10	20
Φ de copa en m	2	3.5	5	8
Φ del tronco a 1.30 m en cm	7	10	20	60



Liquidambar styraciflua

Hamamelidáceas
Liquidámbar

Sombra: Media. Foliación: Caduca (otoño-invierno).
Longevidad: 60 años. Origen: Nativa (América del Norte, México)

Edad	5	10	20	Max
Altura (m)	4	7-8	15	20
DC (m)	1.5	4	7	8
DAP (cm)	15	20	45	90



Buddleia cordata

Loganiáceas
TEPOZÁN

Sombra: Media. Foliación: Perenne.

Crecimiento: Rápido. Longevidad: < de 25 años.

Origen: Nativa (Norte de México, Eje Neovolcánico, hasta Guatemala, silvestre en la Cuenca del Valle de México).

Tabla de crecimiento

AÑOS	5	10	20	Máx.
Altura en m	3	6	10	20
Φ de copa en m	2-3	3-5	5-6	12
Φ del tronco a 1.30 m en cm	7	40	70	>200



Phytolacca dioica

Fitolacáceas

FITOLACA, OMBÚ, BELLA SOMBRA

Sombra: Densa. Foliación: Perenne.

Crecimiento: Rápido. Longevidad: 45 años.

Origen: Inducida (Argentina, Brasil, Ecuador y Perú).

Tabla de crecimiento

AÑOS	5	10	20	Máx.
Altura en m	4	6	10	12
Φ de copa en m	3	8	10	15
Φ del tronco a 1.30 m en cm	15	30	50	200

Ligustrum lucidum

Oleáceas

TRUENO, TRUENO DORADO



Sombra: Densa. Foliación: Perenne.

Crecimiento: Rápido. Longevidad: > de 25 años.

Origen: Inducida (China, Corea y Japón).

Tabla de crecimiento

AÑOS	5	10	20	Máx.
Altura en m	4	8	10	12
Φ de copa en m	4	6	8	10
Φ del tronco a 1.30 m en cm	10	20	30	120



Cupressus lindleyi

Cupresáceas
CEDRO BLANCO, CIPRÉS, TLAZCAN

Sombra: Densa. Foliación: Perenne.

Crecimiento: Medio. Longevidad: 50 años.

Origen: Nativa (México hasta Guatemala. Nativa del Valle de México).

Tabla de crecimiento

AÑOS	5	10	20	Máx.
Altura en m	3	6	15	30
Φ de copa en m	1.5	2	3	5-10
Φ del tronco a 1.30 m en cm	12	20	30	> 80



Acacia longifolia

Leguminosas
ACACIA



Sombra: Densa. Foliación: Perenne.
Crecimiento: Rápido. Longevidad: < 30 años.
Origen: Inducida (Australia).

Tabla de crecimiento

AÑOS	5	10	20	Máx.
Altura en m	2	4	6	15
Φ de copa en m	2	4	6	6
Φ del tronco a 1.30 m en cm	5	15	20	> 80



Pinus ayacahuite

Pináceas
PINO, OCOTE

Sombra: Densa. Foliación: Perenne.
Crecimiento: Medio. Longevidad: > a 100 años.
Origen: Nativa (Centro de México hasta Guatemala).

Tabla de crecimiento

AÑOS	5	10	20	Máx.
Altura en m	4	10	20	35
Φ de copa en m	3	6	8	12
Φ del tronco a 1.30 m en cm	20	35	80	>150