



Informe sobre:
Asentamientos humanos: Bioclima, isla de calor y consumo eléctrico

Del estudio:
Generación de escenarios de cambio climático a escala regional, al 2030 y 2050; evaluación de la vulnerabilidad y opciones de adaptación de los asentamientos humanos, la biodiversidad y los sectores ganadero, forestal y pesquero, ante los impactos de la variabilidad y el cambio climáticos; y fomento de capacidades y asistencia técnica a especialistas estatales que elaborarán programas estatales de cambio climático

*Ernesto Jáuregui
Adalberto Tejeda
Elda Luyando
Mario Casasola
Guillermo García*

Noviembre 2008

Índice

1. Climogramas bioclimáticos	3
2. Escenarios de consumos eléctricos en viviendas para ciudades o conurbaciones mayores de 1 millón de habitantes	7
3. Ondas de calor en tres ciudades de México	13
4. Tendencias esperadas combinando cambio climático e isla de calor	23
Referencias	26

1. Climogramas bioclimáticos

Se analizó el bioclima de las ciudades grandes y medias como una aproximación del grado de comodidad o incomodidad de sus habitantes, bajo escenarios de cambio climático. Se obtuvieron climogramas bioclimáticos y escenarios de consumos eléctricos en viviendas, para ciudades o conurbaciones mayores de 1 millón de habitantes.

Un climograma es la forma gráfica en que pueden mostrarse las condiciones, en este caso bioclimáticas, que suceden a lo largo del año. La idea de mostrar a través de colores cuáles son las sensaciones térmicas para un lugar da una visión rápida de las condiciones de confort o inconfort, de forma horaria y estacional.

Cada climograma representa de forma horaria la Temperatura Efectiva (Missenard 1937) y se relaciona con una tabla de sensaciones. Se generó una base de datos horaria para todo el año.

Se calcularon y elaboraron climogramas bioclimáticos para once ciudades o conurbaciones (Puebla-Tlaxcala, León, Tijuana, Cd. de México, Cd. Juárez, Monterrey, Guadalajara, La Laguna, Toluca, Acapulco y Veracruz), considerando:

- escenario base de temperatura y humedad relativa, para el periodo 1981-2000.
- escenarios de cambio climático para el horizonte temporal 2030 y 2050, para tres modelos de circulación (HADLEY, ECHAM, GFDL), considerando escenarios (A2 y B2) de emisiones de gases de efecto invernadero. Ver anexo.

Metodología

Missenard (1937) definió a la temperatura efectiva (TE) como el equivalente a la temperatura del aire en calma que experimentaría un sujeto sedentario, sano, a la sombra, vestido con ropa de trabajo, si la humedad relativa fuera del 100%. Su expresión matemática es:

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

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

Para realizar el cálculo de los climogramas son necesarios datos horarios representativos, por eso a partir de datos medios mensuales y con el procedimiento propuesto por Tejeda (1991) y Tejeda y Rivas (2001) se obtuvieron los valores horarios medios mensuales de temperatura y humedad del periodo 1981-2000, para las once zonas metropolitanas *ZM indicadas anteriormente*, a los cuales de forma lineal se le sumó los incrementos ó anomalías estimadas a partir de los escenarios de cambio climático, para los 2030's y 2050's (Conde *et. al* 2008)..

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

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

Donde 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 del periodo 1981-2000 de temperaturas máxima y mínima, y de humedad relativa máxima y mínima.

Para definir la temperatura neutra o de confort se tomó el modelo usado por Auliciems y de Dear, 1986.

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

Donde T_n es la temperatura neutra y T_{em} es la temperatura media mensual que posteriormente se sustituyó por los valores horarios medios mensuales. Se definió un intervalo de confort cada 2°C. Así se obtuvieron los puntos de intersección en el nivel de confort, los cuales se proyectan en el eje de las abscisas que sumados a la ecuación 4 resulta:

$$T_{n_{inferior}} = 19.6 + 0.31T_{em} \quad (5)$$

$$T_{n_{superior}} = 15.6 + 0.31T_{em} \quad (6)$$

Sustituyendo el valor de la temperatura del aire en la ecuación 1 por la temperatura neutra inferior y superior, se obtienen los límites del intervalo de confort para los índices bioclimáticos. Este procedimiento es similar al que fue aplicado para la SET (temperatura efectiva estándar) por la norma ANSI/ASHRAE 55 (2004). De forma que se obtienen la siguiente expresión que define el intervalo de confort fijado para la TE , con una humedad relativa fijada al 50%.

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

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

Con los datos de temperatura de forma horaria y con los criterios establecidos en las ecuaciones 7 y 8 se realizó el coloreado de las sensaciones térmicas de forma horaria, representativas de las zonas metropolitanas, las categorías fueron escogidas como son representadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Escala de sensaciones térmica utilizada

	Frío extremo
	Muy frío
	Frío
	Frío moderado
	Muy fresco
	Fresco
	Ligeramente fresco
	Neutro
	Cálido confortable
	Calor moderado
	Calor pesado
	Calor extremo

Resultados

El análisis comparativo de los climogramas muestra diferencias en cuanto a las sensaciones térmicas en la mayoría de las ciudades, para todos los modelos y escenarios utilizados, respecto al escenario base (Ver anexo climogramas). En algunos casos, el calentamiento esperado bajo condiciones de cambio climático aparenta ser benéfico para aquellas ciudades de clima muy fresco

(como Toluca) o bien con inviernos muy fríos, con lo cual es probable que la energía necesaria para calefacción posiblemente disminuirá su demanda.

En el caso de ciudades cálidas, tanto secas como húmedas (Acapulco, Veracruz, Torreón, Monterrey), mientras que en el escenario base el máximo observado, según la tabla de sensaciones, es de “calor pesado” en los meses de mayo, junio, julio y agosto, en las horas del medio día, los cálculos para los escenarios futuros del 2030 y 2050, revelan un incremento a “calor extremo”, aumentando el estrés por calor sobre la población. No hay diferencias importantes entre los tres modelos de circulación considerados, siendo ECHAM, quizá, el que muestra los valores extremos.

Estos resultados por sí solos dan idea de las posibilidades de la incomodidad y estrés térmico que enfrentará la población en un futuro cercano, donde la cuestión sanitaria está implícita. Pero también dan una señal de los potenciales incrementos en los requerimientos y demandas de una población cada vez más necesitada de ambientes confortables, lo que conducirá a un aumento en los consumos de energía eléctrica para enfriamiento.

2. Escenarios de consumos eléctricos en viviendas para ciudades o conurbaciones mayores de 1 millón de habitantes

Es probable que los consumos eléctricos domésticos para distintos tipos de usuarios en la República Mexicana se verán afectados ante el cambio climático, por lo que se presentan los escenarios de consumos eléctricos esperados para el escenario base (periodo 1981-2000), los 2030's y 2050's. Con las Normales Climatológicas 1981-2000 se obtuvo la demanda por enfriamiento requerida actualmente para alcanzar los niveles de confort de la población, para las Zonas Metropolitanas del país que superan el 1 000 000 de habitantes, además de Acapulco y Veracruz (Tabla 2). Se usó el índice bioclimático de *temperatura efectiva*, los escenarios A2 y B2 de los modelos ECHAM, HADLEY y GFDL además de considerar el crecimiento poblacional. El resultado es el incremento hacia mediados del siglo del consumo eléctrico, superior al 40% con respecto al actual.

Tabla 2 Zonas Metropolitanas con población mayor a 1 000 000 habitantes y la fuente utilizada de datos meteorológicos.

Zona Metropolitana	Datos meteorológicos		Factor utilizado
	Observatorio	Estación climatológica convencional	
Guadalajara	Guadalajara	Ciudad Juárez	H
Juárez			
Laguna	Torreón	Tijuana	
León	León		
Monterrey	Monterrey		
Tijuana			M
Distrito Federal-México	Tacubaya		
Puebla-Tlaxcala	Puebla		V
Toluca	Toluca		
Acapulco	Acapulco		
Veracruz	Veracruz		

Nota: las letras del factor se refieren a; Hermosillo, V: Veracruz, y M: Medio.

Datos y métodos

Para la generación de escenarios de consumos eléctricos se utilizó la base de datos del conteo de población INEGI (2005) para 11 Zonas Metropolitanas del país (ZM), que contiene las coordenadas geográficas y población de cada una

de ellas. También se utilizaron los datos calculados para la conformación de los climogramas, presentados en el apartado anterior.

Escenarios de consumos eléctricos para los 2030 y 2050

Para obtener escenarios de consumos eléctricos bajo escenarios de cambio climático son requeridas las necesidades de enfriamiento (NE) para los periodos a analizar, por lo cual se hizo uso de los incrementos de temperatura, según los escenarios de cambio climático para el país de Conde et al. (2008) a partir de los modelos ECHAM, GFDL, HADLEY, para los 2030's y 2050's. Los incrementos esperados en las temperaturas máxima y mínima promedio mensuales, así como en la humedad atmosférica, se obtuvieron mediante la aplicación del método de Tejeda (1991) a los resultados de los escenarios de cambio climático.

Con los escenarios se calcularon los cambios en las necesidades de enfriamiento (ΔNE), con respecto a las condiciones actuales, para los 2030's y 2050's de cada Zona Metropolitana, a estos cambios fueron aplicados los factores encontrados por García (2008) para cada índice bioclimático (Tabla 3). Tomando en cuenta las condiciones climatológicas de cada ZM se utilizaron los factores como se ven en la última columna de la Tabla 2 con respecto a la Tabla 3. Los resultados de este procedimiento son una estimación de la demanda por consumo eléctrico (ΔC) por usuario del sector doméstico, ante condiciones de cambio climático (figura 1 y 2).

Tabla 3 Factores encontrados por García (2008) para la Temperatura Efectiva.

	VERACRUZ (V)	HERMOSILLO (H)	MEDIO (M)
Horas- grados	kWh / usuario-año		
HX	1.5	2.0	1.75
TEFEC	2.8	3.3	3.05

Humidex (HX) y Temperatura Efectiva (TEFEC)

El factor demográfico resulta indispensable para especular sobre futuros consumos eléctricos. Puesto que cada habitante requiere de cierto espacio vital mínimo, resulta evidente que la población del país no podrá seguir creciendo indefinidamente en el futuro. Resultados obtenidos con diferentes hipótesis

parecen apuntar que a largo plazo (después del año 2050) la población nacional se acercará a un estado de crecimiento nulo, estabilizándose entre 175 y 250 millones de habitantes (Alonso *et al*, 1994).

Aplicando el procedimiento de Rodríguez *et al.* (2004), con los incrementos en la demanda por consumo eléctrico por usuario, se consideró que cada toma eléctrica (usuario) dará servicio a cuatro personas. Así los incrementos de consumos eléctricos futuros se pueden estimar con las ecuaciones 9, 10 y 11. Los resultados se muestran en las figuras 3 y 4.

$$ICT_{2025} = (\Delta P_{2025})/4 * (C_{actual} + \Delta C_{2025}) \quad (9)$$

$$ICT_{2050} = (\Delta P_{2050})/4 * (C_{actual} + \Delta C_{2050}) \quad (10)$$

$$ICT_{2075} = (\Delta P_{2075})/4 * (C_{actual} + \Delta C_{2075}) \quad (11)$$

Donde ICT es el incremento en el consumo total, $\Delta P/4$ es el incremento en los usuarios, C_{actual} es el consumo medio actual y ΔC es el incremento en la demanda por consumo eléctrico, esperado bajo cambio climático.

Resultados

La Figura 1 muestra los escenarios obtenidos de consumos eléctricos esperados para el sector doméstico, por zona metropolitana para los 2030's. Monterrey, Valle de México y Guadalajara presentan un mayor consumo eléctrico, el que es aportado mayoritariamente por el crecimiento esperado de la población. De forma contraria, en la ZM de Acapulco se espera un decremento de población por lo que en total se tendría una disminución del consumo eléctrico. La línea azul es el consumo actual en cada Zona Metropolitana (ZM), los escenarios de consumos eléctricos de los modelos para los diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se observan encimados en la línea naranja, la línea punteada muestra la desviación estándar entre los diferentes escenarios de cada modelo.

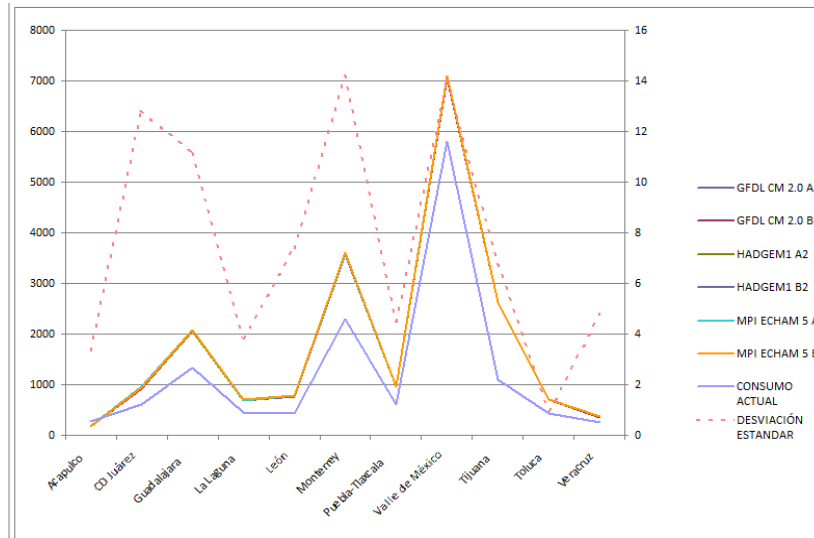


Figura. 1 Consumos eléctricos en el sector doméstico estimados para los 2030's, bajo condiciones de cambio climático.

De forma similar, en la Figura 2 se muestran los escenarios de consumo eléctrico del sector doméstico para los 2050's, pero en estos se considera que la población se estabilizará y la única aportación es debido al calentamiento global esperado. A pesar de ser muy parecidos, este grafico muestra un ligero incremento y una mayor variabilidad entre los resultados obtenidos de cada modelo, para los diferentes escenarios de emisiones de GEI.

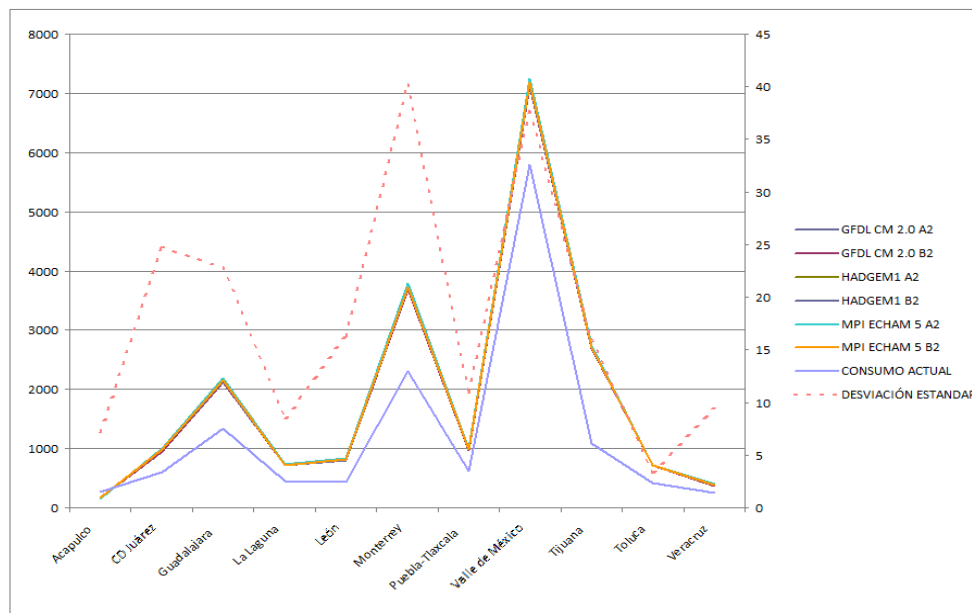


Figura. 2 Consumos eléctricos para el sector doméstico estimados para los 2050's, bajo condiciones de cambio climático.

La Figura 3 muestra el incremento porcentual de la demanda por consumo eléctrico por usuario del sector doméstico para los 2030's, con respecto al periodo base 1981-2000, en las diferentes ZM, directamente relacionado con el aumento de la temperatura esperado ante el cambio climático, donde las zonas costeras como Acapulco y Veracruz tenderán a un mayor consumo eléctrico con respecto a las otras ZM. No se espera un incremento significativo, debido a la metodología empleada, en la ZM de Toluca. Cabe destacar que los resultados obtenidos a partir del modelo ECHAM son los más altos y los menores son obtenidos del modelo GFDL.

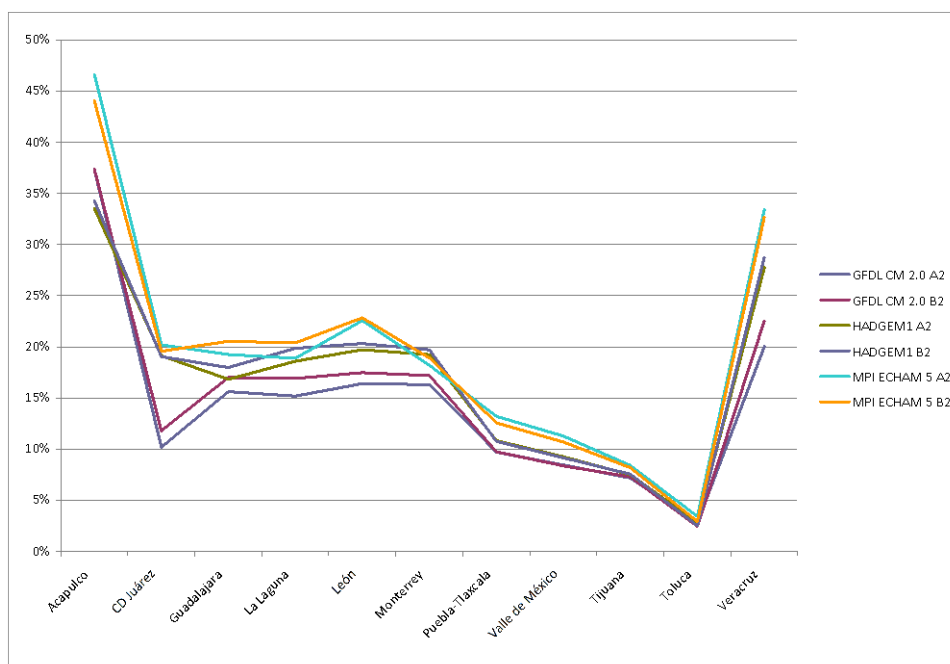


Figura. 3 Incremento porcentual de la demanda por consumo eléctrico por usuario del sector doméstico para los 2030's, bajo condiciones de cambio climático.

La Figura 4 muestra el incremento porcentual de la demanda por consumo eléctrico del sector doméstico por usuario para los 2050's, con respecto al periodo base 1981-2000, en las diferentes ZM, donde en Acapulco y Veracruz se espera un mayor incremento en el consumo eléctrico, muy parecida a la figura anterior.

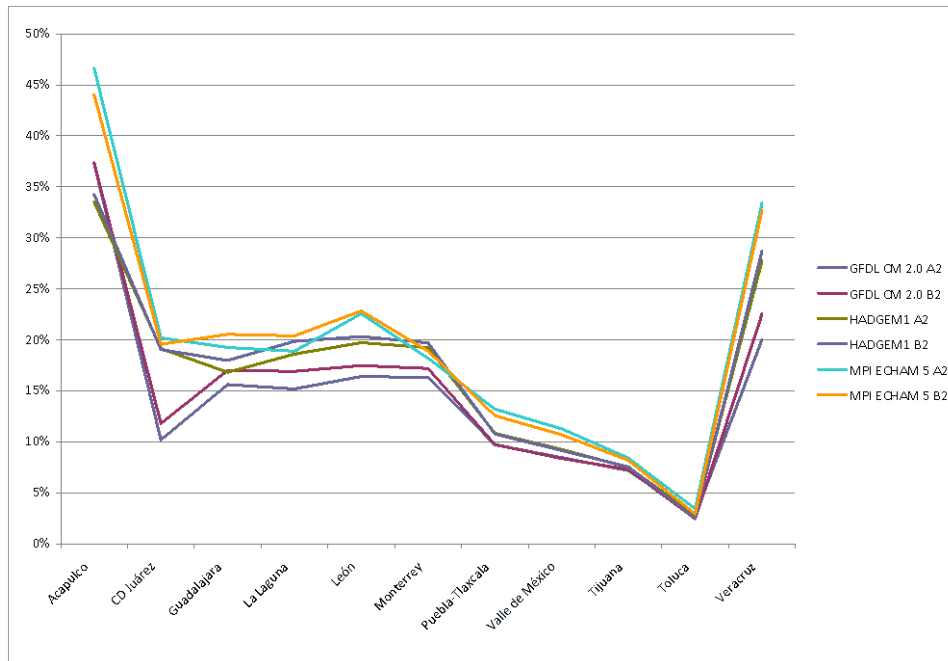


Figura. 4 Incremento porcentual de la demanda por consumo eléctrico por usuario del sector doméstico para los 2050's, bajo condiciones de cambio climático.

3. Ondas de calor en tres ciudades de México

Las ondas de calor son periodos de un tiempo caluroso inusual, el cual es responsable de cifras altas de morbilidad y mortalidad. Se trata de un "...periodo el cual se singulariza por la presencia de varios días seguidos con valores térmicos elevados..."; es decir, que se trata de "...una serie de días consecutivos con temperaturas máximas superiores a un nivel de umbral, definido en referencia a el valor medio de la temperatura máxima diaria..."

La Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) no ha definido totalmente este término, cuyo significado varía en sus características e impacto en cada región o localidad. De acuerdo al Cuarto Informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC 2007), las frecuencias de días cálidos, noches cálidas y ondas de calor se han incrementado en los últimos 50 años, mientras que la tasa de calentamiento ha sido de $0.13^{\circ}\text{C} \pm 0.03^{\circ}\text{C}$ por cada 10 años.

Pero en el fondo subyace la necesidad de una definición de onda de calor para cada sitio en particular. Temperaturas por arriba del percentil noventa o bien por encima de una temperatura específica para cada sitio de interés, son dos de los enfoques más usados. Particularmente López Díaz (2004) para cinco localidades españolas (La Coruña, San Sebastián, Tortosa, Salamanca y Murcia) usó el percentil noventa. Por su parte, Miró y Estrela (2004) se concretaron a realizar un análisis estadístico de series de temperatura para la Comunidad Valenciana en España, y encontraron una tendencia clara al incremento de los días cálidos.

En diversos estudios realizados en España, se pueden ver igualmente diversas definiciones de onda de calor.

Por ejemplo, para Cantabria, según Carracedo et al., (2006) se considera como jornada de calor al conjunto de episodios de altas temperaturas caracterizados por distintas condiciones ambientales, consecuencia de la intervención de mecanismos mesoescalares que modifican los procesos

inducidos por la circulación a escala sinóptica. Estos mecanismos son el resultado de la interacción entre el flujo sinóptico, el relieve y los contrastes en el balance energético entre las superficies marinas y las continentales.

En cambio, López-Díaz (2004) dice que una onda de calor (periodo cálido puro) es “.. aquel intervalo temporal de al menos dos días en que la temperatura máxima y la mínima están siempre por el percentil 80%...Dos periodos cálidos puros sucesivos se agrupan formando un “cluster” (grupo), si la distancia entre ellos es como mucho 24 horas y tanto la temperatura mínima como la máxima están por encima de la mediana de la serie correspondiente...”.

Por otra parte, es claro que la preocupación por estos fenómenos nace de su asociación con incrementos en la mortalidad y el desarrollo de enfermedades. Los procedimientos estándares para evaluar el impacto de las olas de calor en salud humana han mirado generalmente la evolución simultánea de la temperatura máxima y de la mortalidad”.

Kalstein y Davis (1989) determinaron las temperaturas umbrales, que representan la temperatura más allá del cual la mortalidad aumenta para 48 ciudades de los Estados Unidos, tanto para verano como para invierno; correlacionaron las variables como temperatura (máximas, mínimas y extremas), humedad, velocidad del viento, indicadores de contaminación, etc., con la mortalidad por días con temperaturas más allá del umbral. En verano los días calurosos, húmedos, bajo condiciones de calma (sobre todo por la noche), presentan las frecuencias más altas de mortalidad.

Ondas de calor en la Ciudad de México

Para la ciudad de México, Jáuregui (2000) considera que se presenta una onda de calor cuando la temperatura máxima rebasa los 30°C por más de dos días consecutivos. Bajo ese criterio se actualizaron los datos presentados por dicho autor y se encuentra lo mostrado en la Figura 5.

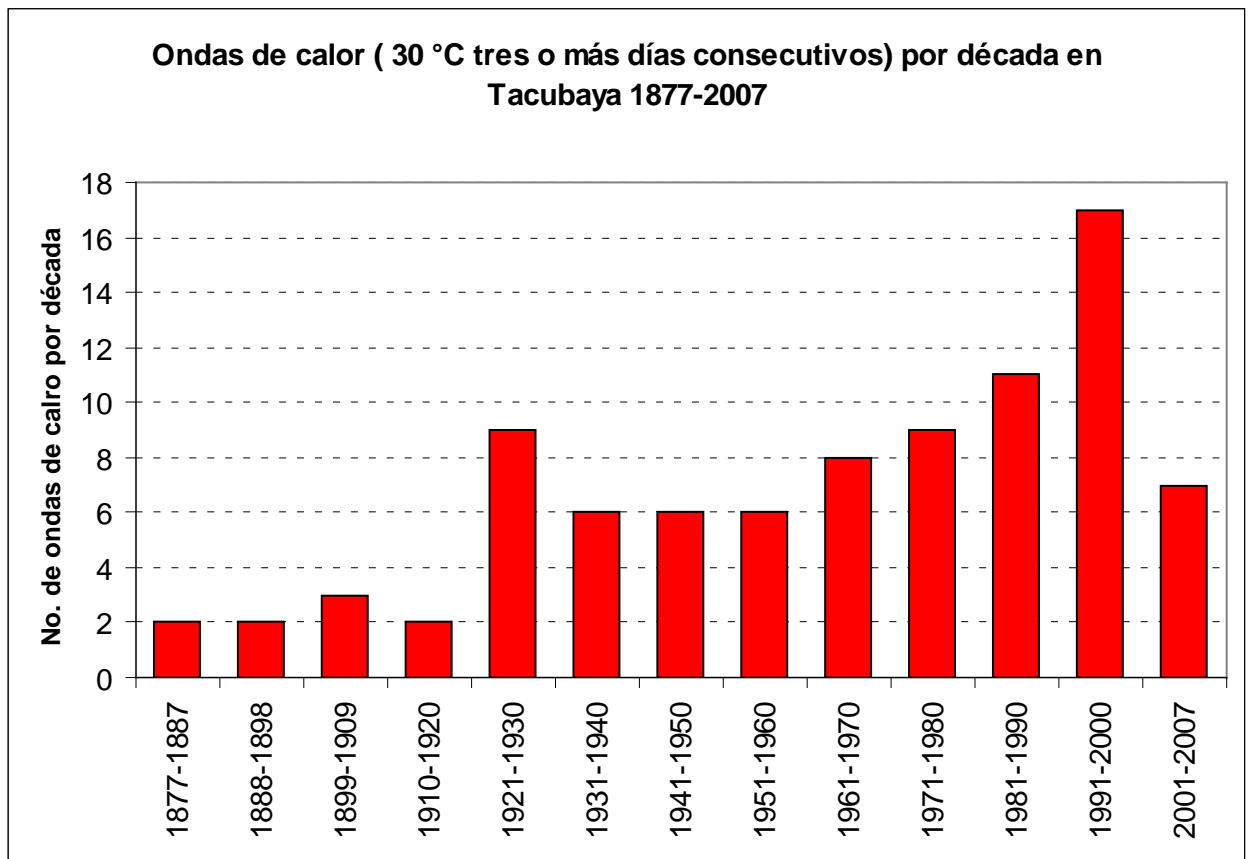


Figura 5. Variación de la frecuencia decadal de ondas de calor observadas en Tacubaya (ciudad de México) en el periodo 1877-2007.

A pesar de la muy probable falta de homogeneidad en los datos durante el largo periodo comprendido en la Figura 5, es notorio el alto número de casos de ondas de calor durante la última década del siglo pasado, lo que está del todo de acuerdo con lo afirmado por el IPCC en su Cuarto Reporte de evaluación. Por otra parte, si bien es cierto que en una megalópolis como la ciudad de México se presenta regularmente el fenómeno de la isla urbana de calor, debe recordarse que ésta ocurre fundamentalmente en las madrugadas por lo que se refleja en las temperaturas mínimas más que en las máximas, de modo que la Figura 5 es una muestra clara de la tendencia de las ondas de calor debidas a variaciones del clima que rebasan el ámbito local.

Ondas de calor en la Ciudad de Veracruz

Los datos de temperatura máxima diaria del periodo 1931-2006 de la ciudad de Veracruz, fueron agrupados por la frecuencia con que se repetía el valor de

las temperaturas más altas formando un acumulado, es decir, es el conteo de uno o varios días que alcanzaron cierta temperatura.

Para determinar el umbral de clasificación se consideraron los dos criterios siguientes:

- Criterio **A**: Al menos dos días consecutivos coincidan o sobrepasen la temperatura fijada como límite arbitrario.
- Criterio **B**: Al menos tres días consecutivos coincidan o sobrepasen la temperatura fijada como límite arbitrario.

Para el criterio **A** se cuantificó el número de casos encontrados en el periodo de 1931-2006, como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Casos contabilizados aplicando el criterio A: al menos dos días consecutivos coincidan o sobrepasen la temperatura fijada como límite arbitrario.

Temperatura en °C/ Periodo en décadas	1931-1940	1941-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2006	Acumulado
32.0-32.9	38	62	90	69	95	90	125	113	682
33.0-33.9	3	10	14	9	16	17	41	57	167
34.0-34.9	0	3	1	1	4	3	15	21	48
35.0-35.9	0	0	1	0	4	1	8	6	20

Tabla 5. Casos contabilizados aplicando el criterio B: al menos tres días consecutivos coincidan o sobrepasen la temperatura fijada como límite arbitrario.

Temperatura en °C/ Periodo en décadas	1931-1940	1941-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2006	Acumulado
32.0-32.9	14	33	40	29	48	45	75	68	352
33.0-33.9	1	7	6	4	7	3	24	29	81
34.0-34.9	0	0	0	0	2	1	5	8	16
35.0-35.9	0	0	0	0	0	0	4	0	4

Es común que el puerto de Veracruz esté a 32 y 33 °C pasando el medio día, por lo cual no se consideró como un umbral de clasificación para una onda de calor.

Por otra parte, los casos de días consecutivos sobrepasando el valor de 35°C se encuentran incluidos dentro de los casos de 34°C; por lo que los 34°C para el criterio B aparecen como un límite aceptable pues los 35°C ocurren esporádicamente, según la Tabla 5.

Por otra parte, se estudiaron los datos usando como criterio parcial de clasificación el percentil 80% propuesto en el trabajo de López Díaz (2004). Así se generó la Tabla 6.

Tabla 6. Percentiles de la temperatura máxima diaria en el periodo 1931-2006, para el puerto de Veracruz.

Mes	Percentiles										
	P max	P min	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90
Enero	34.7	14.3	21.6	22.9	23.7	24.5	25.1	25.7	26.2	26.9	27.6
Febrero	35.6	14.7	22.1	23.4	24.2	24.8	25.3	26.0	26.6	27.2	28.1
Marzo	42.7	18.2	23.6	24.8	25.7	26.4	27.0	27.6	28.1	29.0	30.3
Abril	39.5	19.4	26.1	27.1	28.0	28.5	29.0	29.4	30.0	30.6	31.6
Mayo	40.5	23.6	28.5	29.3	29.7	30.2	30.5	31.0	31.3	31.8	32.7
Junio	38.7	21.3	28.9	29.9	30.4	30.8	31.1	31.5	31.9	32.2	32.9
Julio	34.5	25.4	29.0	29.9	30.5	30.9	31.2	31.5	31.8	32.1	32.6
Agosto	37.2	25.2	29.7	30.3	30.8	31.2	31.6	31.8	32.1	32.4	32.9
Septiembre	38.1	24.5	28.8	29.6	30.7	30.7	31.1	31.4	31.8	32.2	32.7
Octubre	35.8	20.5	27.5	28.5	29.0	29.5	30.0	30.3	30.7	31.2	31.9
Noviembre	34.9	17.8	24.6	26.1	26.9	27.5	28.0	28.5	29.0	29.6	30.3
Diciembre	32.6	13.5	23.0	24.0	24.8	25.5	26.1	26.6	27.2	27.7	28.6

Los datos de la Tabla 6 fueron analizados por mes en el periodo de 1931-2006. De los 54,750 datos de temperatura, 10,980 alcanzan el percentil 80% (es alcanzado casi todos los días en verano), de modo que el valor del percentil no es apropiado en el caso de la ciudad de Veracruz.

La tendencia al incremento de los periodos cálidos en el puerto de Veracruz, se puede observar en la Figura 6.

Comparativo de los umbrales de clasificación arbitrario

Número de días

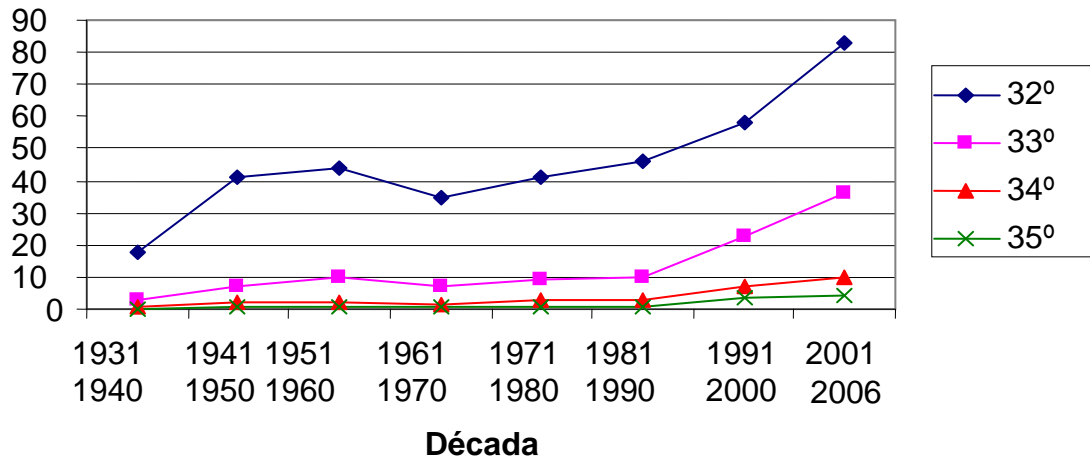


Figura 6. Variación decadal de los casos en que se rebasan distintas temperaturas umbral en el puerto de Veracruz.

Para la temperatura máxima, utilizando el umbral de clasificación de 34°C obtenido de la distribución de frecuencia (Tabla 6), el percentil correspondiente se obtiene de la Figura 7.

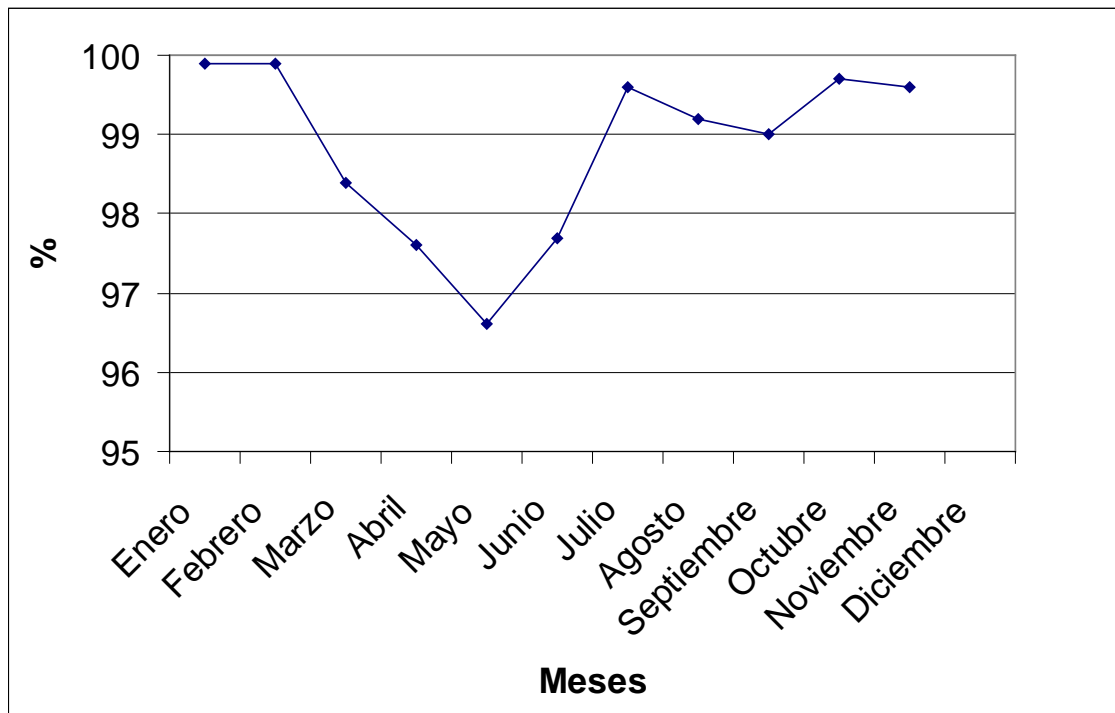


Figura 7 Percentiles correspondientes mensuales a la temperatura de 34°C.

La Figura 7 representa el porcentaje de los datos que se encuentran por debajo de la temperatura de 34.0°C; el percentil menor es en el verano 96%; es decir que los datos que rebasan el percentil del 96% son temperaturas mayores a 34.0 °C.

En resumen, se puede argumentar que es un criterio práctico definir para la ciudad de Veracruz a una onda de calor cuando la temperatura máxima sobrepasa el percentil del 96%, es decir, sobre pasa el umbral de clasificación de 34°C al menos tres días consecutivos.

Se ha observado que las variaciones de algunas variables climáticas parecen estar relacionadas con la distribución temporal y espacial de las enfermedades; en este caso la influencia de las ondas de calor sobre la población del puerto de Veracruz se correlacionan con el desarrollo o proliferación de bacterias y vectores causantes de las enfermedades intestinales, en el periodo 2003-2006, tal como se observa en la figura 8.

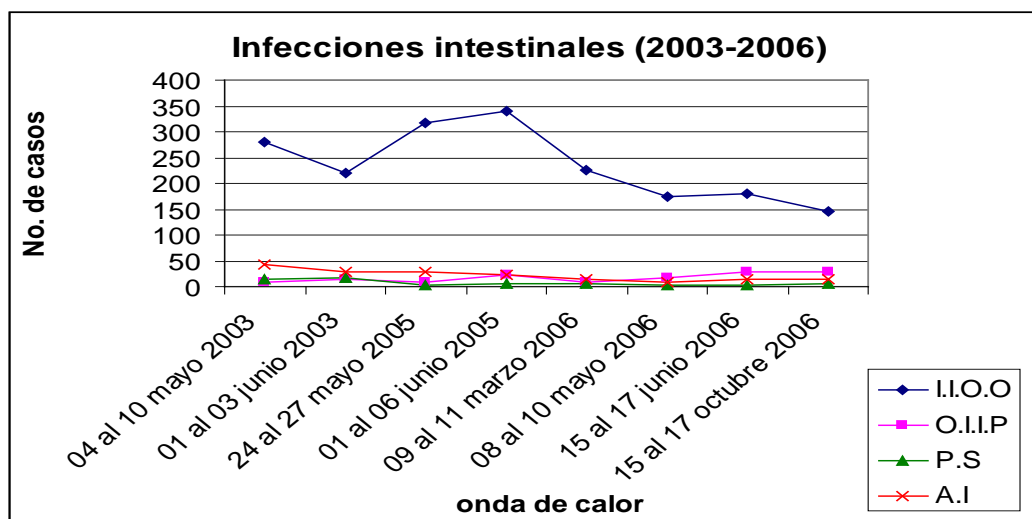


Figura 8. Casos de infecciones intestinales registradas por semana epidemiológica en el periodo 2003-2006 donde: a) I.I.O.O es Infección intestinal por otros organismos; b) O.I.I.P Otras infecciones intestinales debidas a protozoarios; c) P.S Paratifoidea y otras salmonelosis; d) A.I Amibiasis intestinal.

Ondas de calor en la Ciudad de Mexicali

Un estudio realizado por Cueto et al., (2008) para el noroeste de México –con énfasis en Hermosillo y Mexicali- propone que una onda de calor podría ser definida por la determinación de los valores superiores a la *normal* durante tres

o más días consecutivos; cuando la humedad es alta es probable que el tiempo caluroso cause un estrés adicional si una onda de calor dura varios días. En su trabajo define a las ondas de calor como dos o más días consecutivos con temperaturas superiores a 40.6 °C (Temperatura Aparente) y un umbral de clasificación de 37 °C por el estrés térmico que se asocia con temperaturas por encima de la temperatura corporal (37 °C). Evaluó el impacto de las ondas de calor por medio de la aplicación del concepto de *temperatura aparente*, es decir, es el índice de calor que incluye el efecto combinado de alta temperatura y humedad.

En específico para Mexicali, García-Cueto et al. decidieron considerar como umbral el valor de 44°C, que es el percentil 90 de los datos diarios de temperatura máxima (Tmx) del verano en el período de estudio (1951-2006). Ya que el umbral es el más alto de los encontrados en los estudios revisados previamente, se decidió que un día es suficiente para contabilizarla como onda cálida, sin importar si en días previos o posteriores se presenta un valor más bajo que el umbral elegido.

Dichos autores encontraron que el verano es actualmente más caliente y más extenso de lo que era hace veinte años, y se tienen 2½ veces más ondas de calor que en la década de 1971-1980; las variables que caracterizan a las ondas de calor tienen una tendencia ascendente y la distribución más adecuada para modelar su ocurrencia fue la Weibull, con la temperatura máxima como covariable. La consideración de escenarios de cambio climático indica que para los períodos 2010-2039, 2040-2069, y 2070-2099, las ondas de calor se incrementarán en Mexicali, Baja California, respecto del escenario base, en 2.7, 4.6 y 6.9 veces, respectivamente.

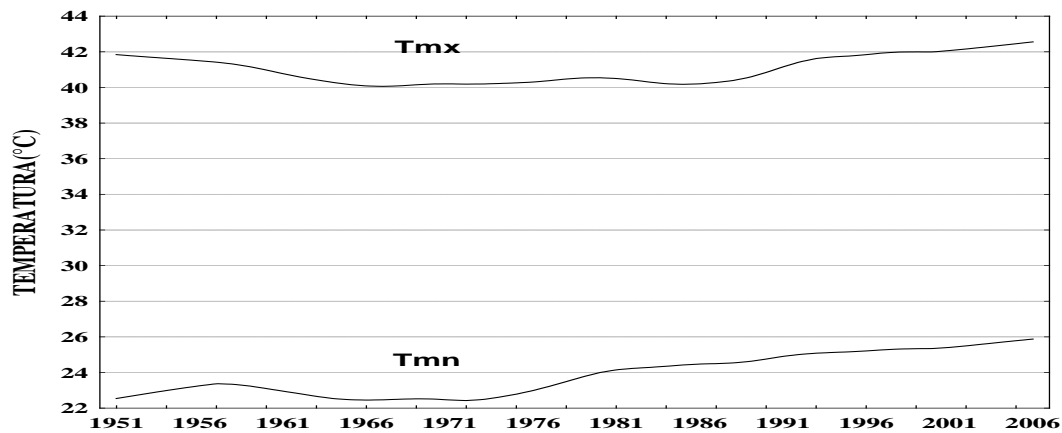


Figura 9. Evolución anual de las temperaturas máximas (Tmx) y mínimas (Tmn) durante el verano, en el período de 1951 a 2006, en Mexicali, B.C., México

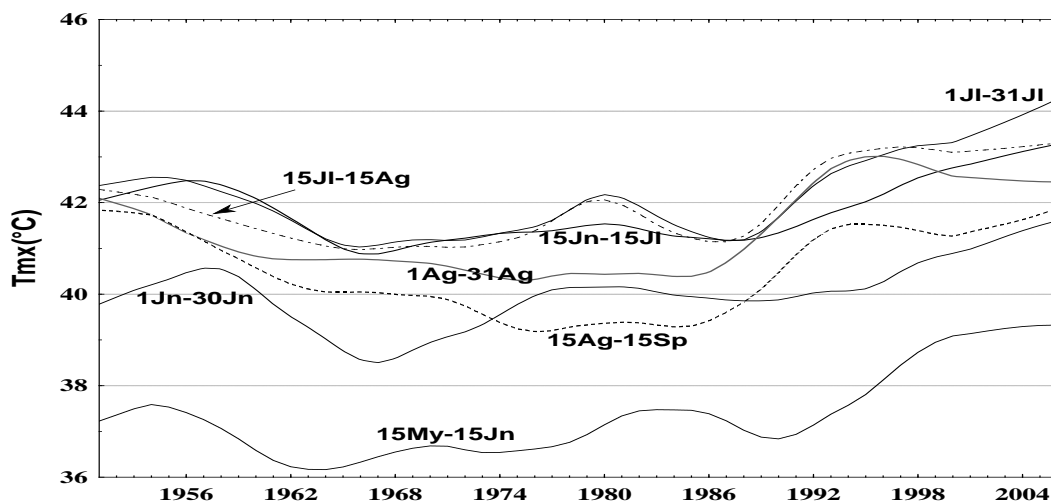


Figura 10 Evolución anual de la temperatura máxima (Tmx) en siete períodos traslapados de un mes durante el verano en Mexicali, B.C., México (1951-2006)

Las figuras 9 y 10 muestran de manera clara la tendencia reciente al incremento de periodos cálidos en Mexicali. Pero más aún, al aplicar la definición de onda de calor a partir de 44°C, enunciada previamente, se encontraron 469 ondas cálidas, o equivalentemente a 469 eventos cálidos extremos. En la Figura 11 se muestra su comportamiento relativo por décadas, y en la que se demuestra su tendencia ascendente a partir de la década de los 70's. De hecho, en el último período (1991-2006) se tienen 2½ veces más episodios cálidos que en la década de 1971-1980.

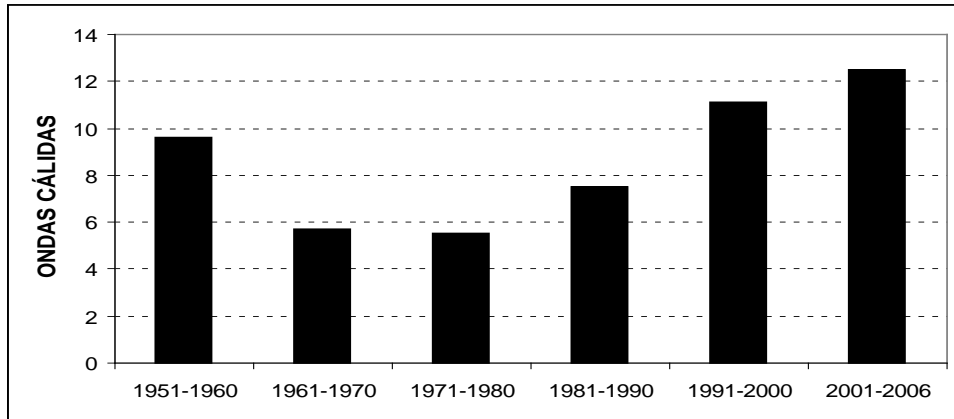


Figura 11. Frecuencia Relativa de Ondas Cálidas (temperatura > 44°C durante 1 ó más días consecutivos) en Mexicali, B.C., México, en el período de 1951 a 2006.

4. Tendencias esperadas combinando cambio climático e isla de calor

El cambio climático global es un tema que causa cada vez más controversia sobre la magnitud y alcance que el hombre ha tenido para modificar el medio. El inicio de este cambio se da principalmente en las ciudades: la cubierta natural pre-existente da paso de forma drástica a un nuevo uso del suelo que se adapta a las necesidades de una sociedad cada vez más demandante de recursos y de espacio.

Una ciudad, en sí, constituye ya un ecosistema que no siempre (quizá nunca) resulta en un equilibrio, donde hay un gran consumo de energía, una hidrología nueva, lo mismo que la población vegetal, la topografía, la calidad del aire y, por supuesto, un clima también diferente.

Una ciudad, tomando en cuenta sus dimensiones, puede llegar a modificar las características de la estructura vertical de la atmósfera (Oke, 1988). La influencia de la superficie de la Tierra en la atmósfera se limita a los primeros 10 kilómetros en una capa llamada Troposfera. Sobre periodos determinados de aproximadamente un día, esta influencia se restringe a una capa mucho más delgada conocida como “capa límite atmosférica” cuya altura no es constante y depende de la fuerza de mezclado, producto del calentamiento de la superficie.

El clima de las ciudades, diferente al que se encuentra en los alrededores rurales, está directamente relacionado con la forma en que se disipa la energía proveniente del Sol, dando como resultado fenómenos tan característicos como la isla de calor: durante el día, los materiales en las ciudades se calientan de forma progresiva e incluso más lentamente que los suelos con vegetación o desnudos de las zonas rurales, pero durante la noche los materiales urbanos conservan durante más tiempo el calor ganado durante el día, mientras el campo se enfría a gran velocidad. Esto es, en las ciudades la superficie original se encuentra recubierta de materiales más densos, impermeables y con una capacidad y conductividad térmica mayores que las de la cubierta natural. La presencia de edificios y calles forman los cañones urbanos, dando a la ciudad

un aspecto rugoso y discontinuo, donde el calor acumulado en las superficies tiene mayor dificultad para disiparse. Además, esta presencia de edificios y construcciones diversas modifica el movimiento del aire en superficie, pues reduce su velocidad dificultando aún más esta pérdida de calor. La isla de calor se presenta en aire en calma y cielos despejados, condiciones que se producen generalmente durante la época invernal.

Es bien conocido que entre mayor sea un área urbana y la población que contiene, la diferencia de temperatura ciudad-campo será aun más marcada. Las principales ciudades del país siguen creciendo en los dos aspectos, lo que hace suponer que la isla de calor ya existente tenderá a ganar intensidad. Si además se agrega el efecto del cambio climático, el efecto será mayor.

En la Tabla 7 se muestran los incrementos de temperatura, bajo condiciones de cambio climático, que cada modelo de circulación general estima para los 2030's; estos valores son agregados a la isla de calor máxima (ICM), calculada para la población en el año 2000.

Tabla 7 Incrementos de temperatura, bajo condiciones de cambio climático, a la isla de calor máxima (ICM) para las ciudades mayores a un millón de habitantes (excepto Veracruz y Acapulco), para los 2030's.

	Población año 2000 en millones de hab.	ICM 2000	Temperatura bajo escenarios de cambio climático generada por diferentes modelos de circulación global					
			GDFL A2	GFDL B2	ECHAM A2	ECHAM B2	HADGEM A2	HADGEM B2
Ciudad de México	18 396 677	6.5	2.3	2.4	2.6	2.6	2.5	2.5
Monterrey	3 374 361	5.1	2	2.2	2.2	2.3	2.3	2.4
Guadalajara	3 699 136	5.1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.2	2.3
Cd. Juárez	1 218 817	4.2	1.7	1.9	2.2	2.3	2.3	2.4
Puebla	2 220 533	4.7	1.9	1.9	2.2	2.1	2	2
Toluca	1 471 146	4.3	1.8	1.8	2.1	2	1.9	1.9
Torreón	1 007 291	4.0	1.8	1.9	1.9	2.1	2	2.1
Tijuana	1 352 035	4.3	2.1	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3
León	1 269 179	4.2	1.8	1.9	2.1	2.1	2	2
Acapulco	791 558	3.8	1.7	1.7	1.9	1.8	1.6	1.6
Veracruz	677 851	3.7	1.4	1.5	1.7	1.7	1.6	1.6

Para obtener la isla de calor máxima se aplicó un método basado en el trabajo de Jáuregui y Tejeda (2004). Como se puede observar, los modelos de

circulación general muestran resultados semejantes en la mayoría de las ciudades, las diferencias entre los incrementos no son significativas, pero el aumento a los valores de la isla de calor máxima puede resultar en cambios que sí lo sean y que se traduzcan en impactos en la población y en las actividades que se desarrollan en las ciudades.

Referencias

- Alonso, A., Cruz, R. y Fugarolas, E. 1994. Futuros de los recursos energéticos, en *El sector eléctrico de México* (Daniel Resendiz Nuñez coordinador), Comisión Federal de Electricidad y Fondo de Cultura Económica, México: 427-475.
- ANSI/ASHRAE 55, 2004. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers* / 16-Apr-2004 / 30 pages
- Auliciems, A. y de Dear, R. 1986. Air- conditioning in Australia: Human thermal factors. *Architectural Science Review* 29(3) :67-75.
- Burgueño A, Lana X, Serra C. Episodios significativamente cálidos y fríos registrados en el observatorio Fabra, Barcelona. En: *El tiempo del clima*. Valencia España: Asociación Española de Climatología. 2001 pp 303-311.
- Carracedo V, Pacheco S, Rasilla Gimena D y García-Codron J. C. 2006. Temperaturas máximas estivales en Cantabria: Comportamiento espacial y mecanismos responsables. En: *Clima sociedad y medio ambiente*. Zaragoza España: Asociación Española de Climatología. 2006 pp 87-97.
- Conde, C., B. Martínez, O. Sánchez, F. Estrada, A. Fernandez, J. Zavala, C. Gay. 2008. Escenarios de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América . Temperatura y Precipitación. [Documento en línea]. Disponible desde internet en <http://www.atmosfera.unam.mx/cclimatico/escenarios/Escenarios_de_cambio_climatico_Mexico_2008.htm
- De Dear., R. y Brager, G. S. 2001. The adaptative model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *Int. J Biometeorol.* 45: 100-108.
- Díaz J, García-Herrera R, Trigo M. R, Linares C. 2006. The impact of the summer 2003 heat wave in Iberia: how should we measure it?. *International Journal Biometeorology.* (Vol 50): 159–166.
- García Cueto O. R., A. Tejeda-Martinez y E. Jáuregui-Ostos. 2008. Downscaling estadístico aplicado a las ondas de calor en una ciudad árida del noroeste de México y estimación del efecto del cambio climático global. En *Cambio climático regional y sus impactos*. J. Sigró Rodríguez, M. Brunet India y E. Aguilar Anfrons (Editores). Asoc. Española De Climatología. 823 P.
- García Cueto O. R., Tejeda Martínez A., Jauregui Ostos E ; “ Heat waves in an arid city the northwest of México: currently trends and climate change scenarios”; México 2008 (inédito). pp. 13
- García, G. 2008. *Equivalencias de consumos eléctricos domésticos a índices de bioclima humano para siete ciudades cálidas de México*. Tesis de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas. Universidad Veracruzana. 105pp.
- Heidari, S. y Sharples, S. 2002. A comparative analysis of short-term and long-term thermal comfort surveys in Iran. *Energy and Buildings* 34: 607-614.
- Humphreys, M. 1978. A outdoor temperatures and comfort indoors. *Building Research and Practice* 6 (2): 92-105.

- Humphreys, M. y Nicol, J.F. 2002. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings* 34: 667-684.
- Jáuregui Ostos, E. El clima de la ciudad de México. 2000. 1ra ed. México D.F. Plaza y Valdés editores. 129p.
- Jauregui, E. Heat Waves in Northern Mexico. 2006. Merhavim, *Studies in the Geography of Israel and the Middle East*. Tel Aviv University. No.6. pp. 370-382. Israel.
- Jáuregui y Tejeda, 2004. Cuatro décadas de climatología urbana en México. *Estudios de Arquitectura Bioclimática*, Vol VI: 163-178. UAM Iztapalapa y Editorial Limusa, México.
- Kalkstein, L. S., Robert E. Davis. 1989. Weather and Human Mortality: An Evaluation of Demographic and Interregional Responses in the United States. *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 79, No. 1 (Mar., 1989), pp. 44-64
- López Díaz J. A. 2004. Análisis de tendencias en olas de calor a partir de series largas de temperatura. En: El clima entre el mar y la montaña .Santander, España: Asociación Española de Climatología. pp. 347-354.
- Masterson, J. y Richardson, F. A., 1979. *Humidex, A Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity*. Downsview, Ontario: Environment Canada. 45p.
- Miró, J.J, y Estrela, M.J. 2004. Tendencia de temperaturas en los meses de julio y agosto en la comunidad valenciana en las últimas décadas: cambios en la frecuencia de días calurosos. En: El clima entre el mar y la montaña. Santander: Asociación Española de Climatología. pp. 389-398.
- Missenard, A. 1937, *L'Homme et le climat*, Eyrolles, París.
- Nicol, J.F. y Roaf, S. 1996. An adaptative guideline for UK office temperatures, *Energy and Buildings* 23: 169-174.
- Oke , T. 1988. *Boundary layer climates*. Mathuen Ed. New York. 435 pp.
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático 4to reporte.IPCC. On-Line: <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>. Fecha de consulta 25 de junio 2008.
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático 4to reporte.IPCC. On-Line: <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>. Fecha de consulta 25 de junio 2008.
- Pejenaute Goñi J.M. 2004. La ola de calor de agosto de 2003 en Navarra. En: El clima entre el mar y la montaña. Santander España. Asociación Española de Climatología. pp 105-114.
- Rodríguez, L., A. Tejeda-Martínez y G. Utrera-Zárate. 2004. Demanda eléctrica para enfriamiento residencial en el estado de Veracruz ante la duplicación de CO₂ atmosférico. *Estudios de Arquitectura Bioclimática*, Vol VI: 325-338.
- Tejeda, A. y 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, M. A. 1991. An exponential model of the curve of mean monthly hourly air temperature. *Atmósfera* 4: 139-144.

Tejeda, M. A. y García, C. R. 2002. A comparative simple method for human bioclimatic conditions applied to seasonally hot/warm cities of México, *Atmósfera* 7: 179-184.

Tejeda, A., C. Conde-Álvarez and L. E. Valencia-Treviso. 2007. Climate change scenarios of extreme temperatures and atmospheric humidity for Mexico. Sometido a *Atmósfera*.