

## UN ESCENARIO DE BIOCLIMA HUMANO EN CIUDADES DEL SUR DE MÉXICO, BAJO CONDICIONES DE 2xCO<sub>2</sub> ATMOSFÉRICO

Adalberto TEJEDA MARTÍNEZ\* y David A. RIVAS CAMARGO\*\*

\* *Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana.*

\*\* *Centro de Investigaciones y Estudios Superiores de Ensenada, Ensenada, B. C. (México)*

### RESUMEN

Aplicando el concepto de temperatura efectiva (*TE*), se presenta un escenario de las condiciones de bioclima humano de cuatro ciudades importantes del sur de México, obtenido al utilizar resultados de predicciones regionales de modelos de circulación general (GCM) para el caso de una duplicación en la concentración de CO<sub>2</sub>. Los resultados se ilustran con gráficas de las condiciones de confort actuales y futuras para el sur del país. Se encontró que las condiciones actuales del ambiente cambiarán a una atmósfera más cálida debido al proceso de urbanización y al efecto invernadero. El impacto en la población será más importante durante la estación cálida (marzo-mayo) cuando el bioclima de la ciudad probablemente pase de la condición actual a la categoría de la escala de condiciones cálidas (*TE* 24-27°C).

**Palabras clave:** bioclima humano urbano, sur de México, escenario bioclimático.

### ABSTRACT

*Applying the concept of effective temperature, a scenario of bioclimatic conditions for four southern cities of Mexico is presented by using results from regional GCM predictions for CO<sub>2</sub> doubling. Current and future bioclimatic graphs for the southern part of the country are presented. Current environmental conditions will likely change toward a warmer atmosphere due to both the urbanization process and greenhouse effect. The impact on the population will be more important during the warm season (March-May) when the bioclimate of the city will likely shift away from current condition to the next scale category: ET 24-27C.*

**Key words:** *urban human bioclimate, south of Mexico, bioclimate scenario.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Diversos autores pronostican que los incrementos medios para las condiciones de temperatura globales bajo una condición de duplicación en la concentración de CO<sub>2</sub> disminuyan conforme aumenta la latitud. En consecuencia, se espera que el impacto del estrés térmico sobre las poblaciones

urbanas debido al efecto invernadero sea relativamente pequeño en los trópicos. Sin embargo, ya que la isla de calor urbana aumenta en intensidad y extensión con el tamaño de las ciudades, la razón de calentamiento del aire urbano será considerable en las ciudades de rápido crecimiento de los países en desarrollo (OKE, 1993).

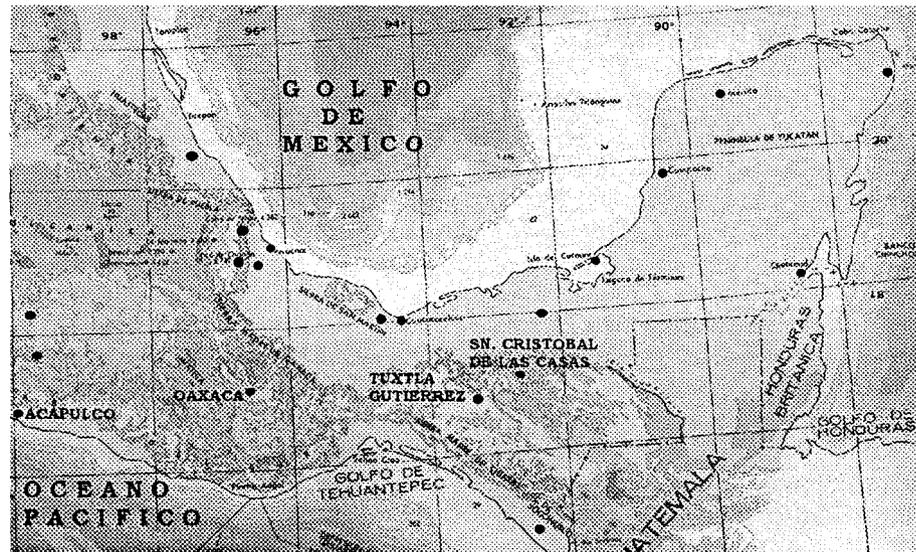


Fig. 1(a): Región de estudio.

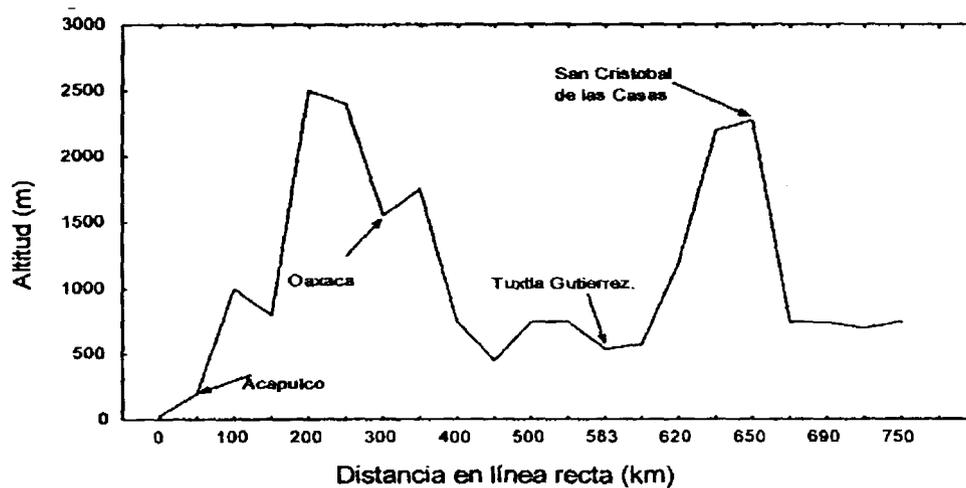


Fig. 1(b): Distancia en línea recta (km).

Las implicaciones del calentamiento global sobre el bioclima urbano en Europa han sido estudiadas por AULICIEMS (1992). Este autor sugiere que, como resultado del aumento del efecto invernadero debido a la duplicación en la concentración de CO<sub>2</sub>, la emisión de gases radiativos en los sistemas de calefacción puede contribuir más al calentamiento global en los países industrializados. Como es de esperarse, en los países en desarrollo el uso de energía para el aire acondicionado probablemente se mantenga bajo, ya que la población, generalmente con ingresos bajos, en vez de invertir dinero se adaptará a las nuevas condiciones térmicas, aclimatándose y cambiando sus vestidos.

Utilizando los conceptos de temperatura efectiva (*TE*) y tendencia relativa, McGREGOR (1995) ha evaluado los cambios probables en el confort humano en el Pacífico oeste ecuatorial y sur tropical como consecuencia del calentamiento global. Para bioclimas futuros, McGregor supone un cambio de temperatura de +2°C con incrementos de presión de vapor de 7 a 14%, lo que incrementará la frecuencia, duración e intensidad de las condiciones de estrés en la región oceánica.

El objetivo de esta ponencia trabajo es presentar un escenario de las condiciones bioclimáticas a escala local para cuatro ciudades del sur de México. El estudio se realizó para las 18 urbes señaladas en la figura 1(a), pero se mostrarán sólo los resultados para Acapulco, Oaxaca, Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal de las Casas, en razón de representar cuatro climas distintos, ubicadas en un transecto de 600 km alrededor de los 17N (figura 1(b)).

Debe aclararse que estos resultados son la continuación de trabajos previos (JÁUREGUI, *et al.* 1996; JÁUREGUI y TEJEDA, 1998; JÁUREGUI y TEJEDA, 2001) que exploran el posible impacto de la duplicación de la concentración de CO<sub>2</sub> en el bioclima humano de México. Aquellos trabajos, apoyados además en las proyecciones demográficas de AGUILAR (1996), concluyen que en el verano de mediados del próximo siglo, 49 millones de mexicanos que ahora no utilizan sistemas de aire acondicionado, los requerirán para estar en condiciones de confort entre media mañana y media tarde, a pesar de los procesos de aclimatación que experimentará la población afectada (Tabla 1). Esa información indica que, para el verano, el consumo energético por climatización de edificios habrá de duplicarse en comparación con la actualidad.

Tabla 1: INCREMENTO EN MILLONES DE HABITANTES URBANOS QUE ESTARÍAN BAJO SITUACIÓN CÁLIDA (MEDIA MAÑANA A MEDIA TARDE) SI OCURRE EL CAMBIO CLIMÁTICO HACIA EL AÑO 2050<sup>1</sup>

Región \ Mes	Enero	Abril	Julio	Octubre
Costas del Pacífico	2	11	13	5
Norte	0	12	23	8
Centro (DF y Estado de Méx.)	0	0	0	0
Interior	0	0	1	0
Costas del Golfo y Caribe	2	10	12	12
Total	4	33	49	25

<sup>1</sup> Según JÁUREGUI *et al.* 1996.

## LOS CLIMAS DEL SUR DE MÉXICO

Los climas de la parte sur del país son por demás variados. La situación geográfica es determinante para que el clima varíe de la costa a la llanura, de las zonas montañosas a las selváticas. En general, la variación anual de la temperatura es pequeña pero el rango diurno es amplio en algunos casos. En la figura 2 se muestran los promedios de temperaturas durante un mes de invierno (enero) y uno de verano (junio). Para ambos casos la ciudad de San Cristóbal de las Casas, registra el promedio de temperatura mínima más bajo (4.1°, y 10.2°C respectivamente); para el mes de enero, el promedio de temperatura máxima más alto lo tiene la ciudad de Acapulco (31.7°C, casi igualado por Tuxtla Gutiérrez, con 31.0°C), mientras que durante junio el promedio de temperatura máxima más alto le corresponde a Tuxtla Gutiérrez (34.5°C).

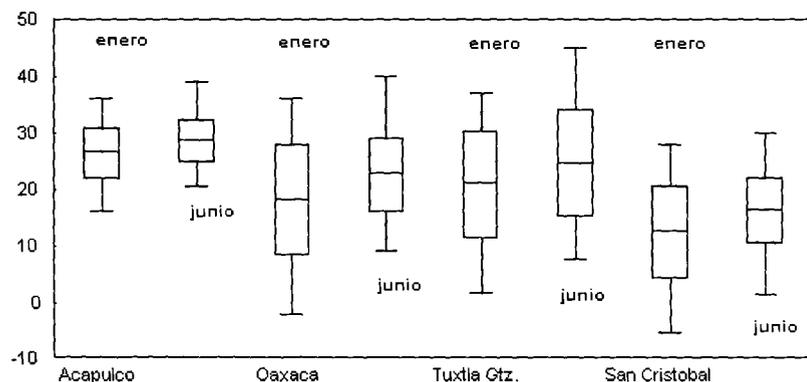


Fig. 2: Temperatura media, promedios de extremas y extremas en °C (1951-1980).

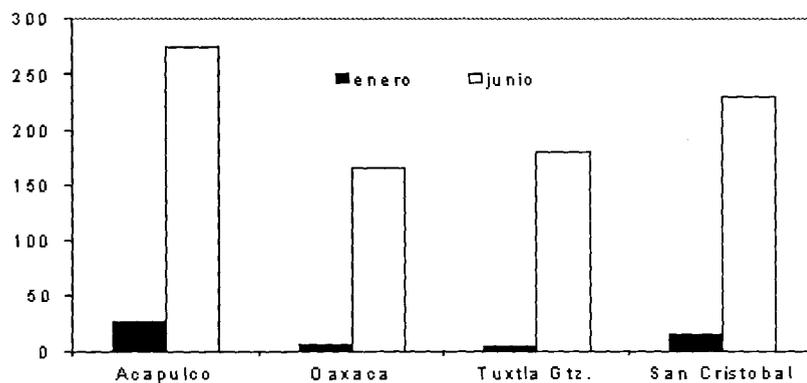


Fig. 3: Precipitación media en mm (1951-1980).

El sur del país se caracteriza por ser una zona lluviosa, principalmente en verano (figura 3). Para enero, Tuxtla Gutiérrez es la menos lluviosa (0.6 mm), mientras que Acapulco es la más lluviosa

(9 mm); para junio Acapulco registra el promedio más alto (265 mm), mientras que el menor corresponde a Oaxaca (152 mm).

## LOS DATOS

Los registros medios mensuales de temperatura media, mínima, máxima y humedad relativa media estuvieron disponibles a partir de los observatorios meteorológicos ubicados en cada una de las ciudades mostradas en la figura 1 para el periodo 1951-1980. Los incrementos en los promedios mensuales de temperatura mínima y máxima para el futuro fueron obtenidos de los escenarios regionales para México derivados de las salidas de los modelos CCCM (canadiense) y GFDL (estadounidense) aplicados a México por CONDE *et al.* (1996).

Generalmente se entiende que los escenarios climáticos regionalizados (para variables como ejemplo temperatura y precipitación) pueden llegar a ser altamente especulativas ya que el error potencial es grande (por ejemplo los efectos de los cambios de nubosidad y otros; ver HARTAMANN, 1994, capítulo 10). Sin embargo, puesto que los modelos seleccionados dieron resultados similares de incremento de temperatura media para el sur del país (entre 2.02° y 2.76°C), se adoptó el valor más bajo para la estimación de la temperatura esperada, cuando se presente una duplicación en la concentración de CO<sub>2</sub>, lo cual se supone en este trabajo que ocurrirá hacia la segunda mitad del siglo XXI (SEMARNAP, 1997).

La población total en cada una de las ciudades fue tomada de los censos de 1990 y del 2000, obteniéndose una tasa de crecimiento a partir de estos valores. La redistribución de la población en las ciudades contribuye al incremento en la densidad del área edificada en los suburbios y, por lo tanto, se esperaría que tienda a mantener alta la tasa de crecimiento de la isla de calor durante el

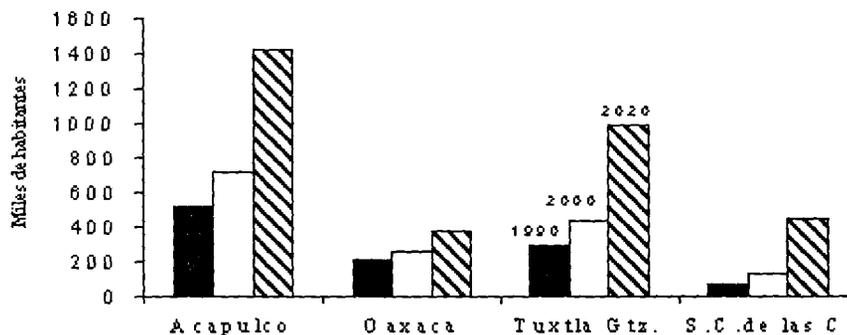


Fig. 4: Poblaciones en los años 1990 y 2000, y estimadas para el 2020.

principio del siglo XXI, hasta llegar quizá a un número constante de la población, alrededor del año 2020, manteniéndose así durante la segunda mitad del siglo XXI, cuando ocurra la duplicación de CO<sub>2</sub> (ver Tabla 1).

## 4. MÉTODO

En la literatura es posible encontrar un amplio rango de índices para evaluar el bioclima humano (para una revisión ver TAESLER, 1986; JÁUREGUI, 1996 y HÖPPE, 1997). El índice que se apli-

ca con mayor frecuencia en México es probablemente la Temperatura Efectiva ( $TE$ ), definida como la temperatura del aire en calma que da la misma sensación térmica que las condiciones ambientales si la humedad relativa fuera del 100%. Mientras el concepto  $TE$  es atractivo por su simplicidad de aplicación (ver HENTSCHEL, 1987) éste ha sido criticado por su aparente insensibilidad a la alta humedad en los climas cálidos (TROMP, 1980); además de que la  $TE$  no toma en cuenta la radiación ni la ventilación.

Propuesta originalmente por HOUGHTEN y YAGLOU (1923), debe notarse que la  $TE$  es un índice de respuesta térmica para individuos sedentarios. Sin embargo, tiene la ventaja de depender de información que proporcionan los escenarios de cambio climático, como se mostrará en esta ponencia.

La ecuación de  $TE$  propuesta por MISSENARD (1937) es:

$$TE = Ta - 0.4(Ta-10)(1-f)$$

donde  $Ta$  es temperatura del aire y  $f$  es la humedad relativa en décimas.

#### 4.1 Estimación de la humedad relativa presente (1951-1980).

Para estimar la  $TE$  es necesario contar con valores medios mensuales de temperatura y humedad relativa ( $T$  y  $f$  respectivamente). En los casos que no se contó con el registro de humedad media mensual, hubo que estimarla.

Primero, para el periodo 1951-1980 se calculó la presión de vapor  $e$  (hPa) media mensual por medio de una ecuación de regresión polinomial:

$$e = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i (Tmin)^i \quad \text{con} \quad (1)$$

$$a_0 = 7.5, a_1 = 8.5 \times 10^{-2}, a_2 = 3.7 \times 10^{-2}, a_3 = -1.7 \times 10^{-3}, a_4 = 1.9 \times 10^{-4}, a_5 = 5.0 \times 10^{-6}$$

donde  $Tmin$  es el promedio mensual de temperatura mínima en °C. El error estándar de estimación es de 3.1 hPa y el coeficiente de correlación lineal de 0.91 (para 67 observatorios meteorológicos en México y 12 meses, es decir 804 casos).

La humedad relativa ( $f$  en decimales) es:

$$f = \frac{e}{e_s}$$

donde la presión de vapor de saturación  $e_s$  se calculó con la ecuación de ADEM (1967):

$$e_s = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i T^i \quad (2),$$

$$b_0 = 6.115, b_1 = 0.42195, b_2 = 1.4206 \times 10^{-2}, b_3 = 3.046 \times 10^{-4}, b_4 = 3.2 \times 10^{-6}$$

#### 4.2 Datos horarios de temperatura y humedad relativa (1951-1980)

Primero, se obtuvieron los valores promedio de humedad relativa máxima ( $fmax$ ) y mínima ( $fmin$ ),

pues las bases de datos sólo contenían humedad relativa media mensual ( $f$ ). En ausencia de advección significativa, GEIGER (1957) sugiere que la presión de vapor ( $e$ ) no varía entre las 10 y las 14 horas, y la humedad relativa mínima promedio (representativa para las 14:00-15:00 horas locales) será entonces:

$$f_{min} = \frac{e}{e_{s,max}}$$

donde  $e$  es la presión de vapor promedio mensual y  $e_{s,max}$  es la presión de vapor de saturación máxima. Ésta fue calculada de acuerdo a la ecuación de ADEM (1967):

$$e_{s,max} = b_0 + \sum_{j=1}^4 b_j (T_{max})^j$$

donde  $T_{max}$  es el promedio mensual de temperatura máxima. Por su parte, la humedad relativa máxima media mensual ( $f_{max}$ ) se puede calcular a partir de la humedad relativa media mensual ( $f$ ), de la siguiente manera:

$$f_{max} = 2f - f_{min}$$

Los valores horarios medios mensuales de temperatura ( $Thor$ ) y de humedad relativa ( $fhor$ ) se obtuvieron a partir del método propuesto en el trabajo de TEJEDA (1990):

$$\begin{aligned} Thor &= T_{min} + (at^b e^a)(T_{max} - T_{min}) \\ fhor &= f_{min} + (1 - at^b e^a)(f_{max} - f_{min}) \end{aligned}$$

### 4.3 Estimación del confort humano 1951-1980

Se estimó la  $TE$  horaria media mensual utilizando la expresión antes mencionada:

$$TE_{hor} = Thor - 0.4(Thor - 10)(1 - fhor)$$

Posteriormente se calcularon los cuatro promedios estacionales de  $TE_{hor}$  ( $TE_{est}$ ). Estos valores fueron utilizados para estimar la  $TE$  preferente estacional, a partir de extender el concepto de AULICIEMS (1992) sobre la temperatura preferente:

$$TE_p = 17.6 + 0.31 (TE_{est})$$

Finalmente, la zona de confort se definió como:

$$ZC = TE_p \pm 2^\circ C$$

Por su parte, las horas grado calor ( $HGC$ ) y las horas grado frío ( $HGF$ ) son la suma de grados Celsius o Kelvin que hay que incrementar ( $HGC$ ) o disminuir ( $HGF$ ) la temperatura efectiva de cada hora durante un día promedio para alcanzar el confort, considerando que éste se alcanza en un intervalo de 2°C alrededor de la temperatura efectiva preferente:

$$\begin{aligned} HGC &= \sum (TE_p - TE_{hor}) & \text{si} & \quad TE < (TE_p - 2^\circ C) \\ HGF &= \sum (TE_{hor} - TE_p) & \text{si} & \quad TE > (TE_p + 2^\circ C) \end{aligned}$$

#### 4.4 Las necesidades de energía para climatización

A partir del dato de población total en cada una de las ciudades se obtuvieron las necesidades de calefacción ( $CQ$ ) y de enfriamiento ( $CE$ ), en  $HGC$  y  $HGF$  por habitante:

$$CQ = HGC \cdot P_{1990}$$

$$CE = HGF \cdot P_{1990}$$

donde  $P_{1990}$  es la población total en el año 1990.

Para la segunda mitad del siglo XXI, se calculó la tasa media anual de crecimiento de población ( $k$ ) para el periodo 1990-2000, de acuerdo al método del Instituto de Estadísticas, Geografía e Informática (INEGI, 2001):

$$k = \left( \frac{P_{2000}}{P_{1990}} \right)^{1/5} - 1$$

donde  $P_{2000}$  es la población en el año 2000.

Al estimar la población total en el año 2020 ( $P_{2020}$ ), se ha supuesto que dicho valor corresponde al valor de población para la segunda mitad del siglo XXI:

$$P_{2020} = P_{1990} e^{k \cdot t}$$

donde  $t$  es el periodo 1990-2020, es decir, 30 años.

#### 4.5 Escenario para condiciones de 2xCO<sub>2</sub>

Para un escenario de duplicación en la concentración de CO<sub>2</sub>, CONDE *et al.* (1996), muestran que los incrementos de temperatura media mensual en C esperados para el sur del país, con dos modelos de circulación general (GCM), el CCCM (modelo canadiense) y el GFDL (modelo estadounidense) ocurren como se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2: INCREMENTOS DE LA TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (C) EN EL CENTRO DEL PAÍS, DE ACUERDO A LOS MODELOS CCCM Y GFDL<sup>1</sup>

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
CCCM	1.8	1.9	1.8	2.1	2.1	1.9	2.0	2.2	2.2	2.5	2.3	2.0
GFDL	2.2	2.9	2.7	1.9	2.3	2.5	2.8	2.5	2.6	2.7	2.6	2.8

<sup>1</sup> En las versiones usadas por CONDE *et al.* (1996).

Como ya se mencionó, se tomaron los incrementos menos alarmistas, es decir, los correspondientes al modelo CCCM. A partir de dichos valores se obtuvieron los valores promedios de temperatura máxima y mínima para condiciones de duplicación de bióxido de carbono:

$$T_{min_{2050}} = T_{min} + \Delta T$$

$$T_{max_{2050}} = T_{max} + \Delta T$$

donde  $\Delta T$  es el incremento de temperatura correspondiente al modelo CCCM tomado de la tabla 2.

Una vez obtenidos los nuevos valores de temperaturas extremas, se rehicieron todas las estimaciones y cálculos antes mencionados (de las secciones 4.1 a 4.5), utilizando  $P_{2020}$  en lugar de  $P_{1990}$ , dando como resultado los escenarios de bioclima y población para condiciones de duplicación del bióxido de carbono atmosférico.

## 5. RESULTADOS

La figura 5 muestra que sin considerar los incrementos poblacionales, localidades de climas cálidos como Acapulco y Tuxtla Gutiérrez requerirán un incremento en sistemas de enfriamiento de hasta un 100%, mientras que Oaxaca (templada actualmente) vivirá una situación cálida inédita.

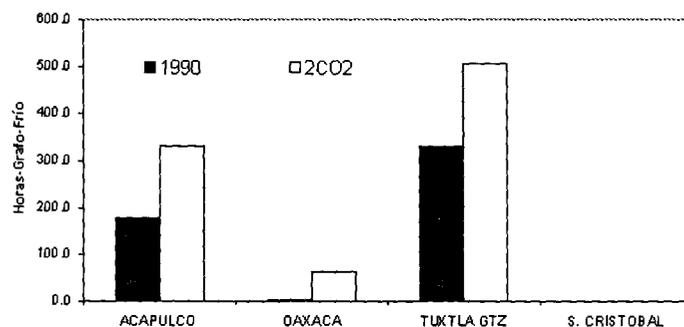


Fig. 5: Necesidades anuales de enfriamiento.

Las necesidades de calefacción se reducen para tres ciudades (figura 6). El pequeño incremento para Tuxtla Gutiérrez se debe a la forma de parametrizar el proceso de aclimatación de los individuos, pues el incremento de temperatura de los meses de transición hacia el invierno hará que se

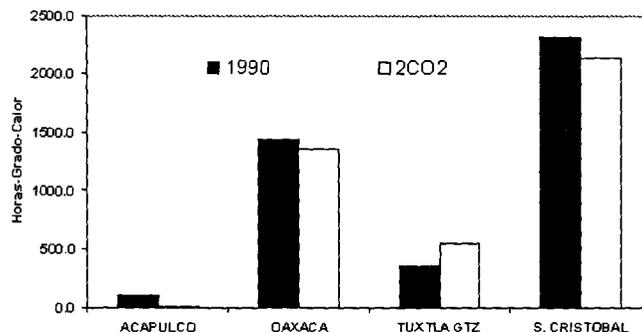


Fig. 6: Necesidades anuales de calefacción.

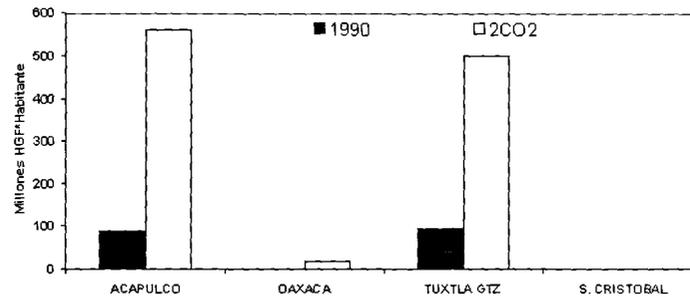


Fig. 7: Necesidades de enfriamiento multiplicadas por la población.

perciban con mayor rigor los descensos de temperatura, y por ende se requiera de calefacción. En cualquier caso los incrementos son poco significativos y pueden resolverse con abrigo, excepto en San Cristóbal donde tanto ahora como en un escenario de cambio climático es necesaria la calefacción.

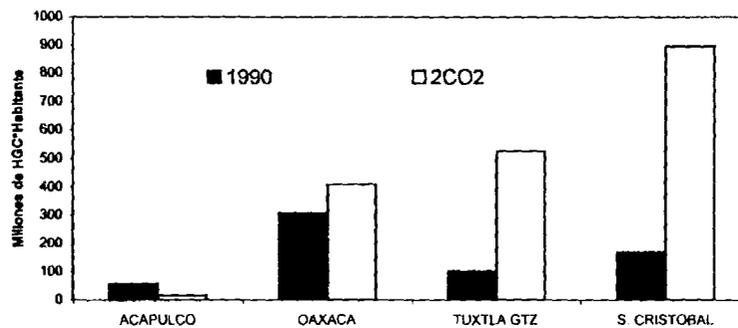


Fig. 8: Necesidades de calentamiento multiplicadas por la población.

Por otra parte, el incremento poblacional y térmico aunados, significan que las necesidades de aire acondicionado pueden incrementarse hasta en un 500% (ver los casos de Acapulco y Tuxtla Gutiérrez en la figura 7), mientras que el impacto del cambio climático en la reducción de calefacción es rebasado por el incremento de población (figura 8).

Finalmente debe aclararse que lo presentado aquí es un análisis preliminar que precisa de las siguientes mejoras en versiones posteriores:

- Usar escenarios más realistas sobre incrementos térmicos y variaciones en la precipitación, lo que implica usar resultados de modelos de circulación general pero con una resolución que permita inferir escenarios climáticos regionales.
- Considerar cifras actuales y escenarios realistas de consumo energético *per capita* y tasas de crecimiento poblacional.

- c) Usar datos climáticos observados de años anómalos y normales para validar los escenarios bioclimáticos.
- d) Incorporar escenarios de migración y de mejoramiento de tecnología de aires acondicionados y diseño de edificios.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración en la preparación final de esta ponencia de los meteorólogos Irving R. Méndez Pérez y Víctor M. Mendoza Carrillo.

## 7. REFERENCIAS

- ADEM, J. (1967): "Parametrization of atmospheric humidity using cloudiness and temperature". *Mon. Wea. Rev.*, 95, 83-88.
- AGUILAR, A. C. (1996): "Crecimiento y distribución regional de los asentamientos humano en México. Condiciones de vulnerabilidad al cambio climático". En *Memorias del 2º taller de estudio de país: México*, 243-250.
- AULICIEMS, A. (1992): "Greenhouse warmed Europe: thermoregulatory criteria for future indoor climate management". *Int. J. Biometeorol.*, 36, 201-209.
- CONDE, C., O. SÁNCHEZ, V. MAGAÑA y C. GAY. (1996): "Escenarios básicos y regionales". En *Memorias del 2º taller de estudio de país: México*. 101-112.
- GEIGER, R. (1957): "*The climate near the ground*". Harvard University Press. Cambridge, 493 p.
- HARTAMANN, D.D. (1994): "*Global physical climatology*". Academic Press, 411 p.
- HENTSCHEL, G. (1987): "A human biometeorology classification of climate for large and local scales". *Proceed. Symp. On climate and human health*, WCPA, WCAP. No.1, Leningrad, 120-138.
- HÖPPE, P. (1997): "Aspects of human biometeorology in past, present and future". *Int. J. Biometeorol.*, 40, 19-23.
- HOUGHTEN, F.C. y YAGLOU C.P. (1923): "Determining lines of equal comfort". *Trans. Am. Soc. Heat Vent Eng.*, 29, 163-176.
- INEGI (2001): "Resultados de los Censos Generales de Población y Vivienda, 1990 y 2000". <http://www.inegi.gob.mx>.
- JÁUREGUI, E. (1996): "Aspects of urban human biometeorology". *Int. J. Biometeorol.*, 40, 58-61.

JÁUREGUI, E., RUIZ, A., GAY, C. y TEJEDA, A. (1996): "Una estimación del impacto de la duplicación del CO<sub>2</sub> atmosférico en el bioclima humano de México". En *Memorias del 2º taller de estudio de país: México*. 219-246.

JÁUREGUI, E. y TEJEDA, A. (en prensa): "Un escenario de las condiciones bioclimáticas en la ciudad de México para una duplicación de CO<sub>2</sub>". En "*El cambio climático en México*", C. GAY y J. MARTÍNEZ (editores), Instituto Nacional de Ecología y programa Universitario de Medio Ambiente.

JÁUREGUI, E. y TEJEDA, A. (en prensa): "A scenario of human thermal comfort in Mexico city for 2CO<sub>2</sub> conditions", *Atmósfera*, 14.

McGREGOR, G.R. (1995): "The human bioclimates of Western South Pacific islands and Climate Change". *Int. J. of Biometeorol.*, 39, 1, 5-12.

MISSENARD, A. (1937): "*L'homme et le climat*". Eyrolles, Paris.

OKE, T. (1993): "Global change and urban climates". *Proceed. 13th Int. Congress Biometeorology*, Calgary, Canada, 123-134.

SEMARNAP, (en prensa): "México: primera comunicación ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático". Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México, 149 p. En "*El cambio climático en México*", C. GAY y J. MARTÍNEZ (editores). Instituto Nacional de Ecología.

TAESLER, R. (1986): "Climate characteristics and human health -the problem of climate classification". *Proceed. Symp. On Climate and Human Health WMO*, Leningrad, 81-119.

TEJEDA, A. (1990): "An exponential model of the curve of mean monthly air temperature". *Atmósfera*, 4, 139-144.

TROMP, S. (1980): "*Biometeorology*". Heyden, London, 346 pp.