

El bioclima humano en urbes del sur de México para condiciones de duplicación de CO₂ atmosférico

Adalberto Tejeda Martínez*
David A. Rivas Camargo**

Recibido: 1 de marzo de 2002

Aceptado en versión final: 11 de noviembre de 2002

Resumen. A partir del concepto de temperatura efectiva (TE), se presenta un escenario de las condiciones de bioclima humano de ocho ciudades importantes del sur de México, obtenido de predicciones regionales de modelos de circulación general para el caso de una duplicación en la concentración atmosférica global de CO₂. Los resultados se ilustran con gráficas de las condiciones de confort actuales y futuras para el sur del país. Se encontró que, pese a los procesos de aclimatación, se intensificarán las sensaciones cálidas debido al efecto invernadero. Combinando lo anterior con proyecciones conservadoras del incremento de la población para la segunda mitad del siglo XXI, se estima que las ciudades de clima cálido quintuplicarán las necesidades de enfriamiento para obtener el confort de sus habitantes.

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

The human bioclimate in southern Mexico's cities under a double atmospheric CO₂ scenario

Abstract. From the concept of effective temperature (ET), a scenario of bioclimatic conditions for eight southern cities of México is presented by using results from regional predictions of general circulation models for the scenario of doubling the global atmospheric CO₂ concentration. Current and future bioclimate graphs for the southern part of the country are presented. Despite the acclimatization process, the bioclimatic conditions will likely become warmer as a result of a greenhouse effect. By combining these results with population projections for the second half of the 21st century, cities with warm climates are estimated to increase in five times the air conditioning requirements.

Key words: Urban human bioclimate, South of México, bioclimate scenario.

INTRODUCCIÓN

No son obvias las consecuencias del posible cambio climático global en el confort térmico humano. Un incremento de temperatura muy probablemente inducirá mayores necesidades de aire acondicionado en las regiones cálidas, pero debe tomarse en cuenta que ese incremento será paulatino y, por lo mismo, susceptible de ser contrarrestado por la aclimatación y la forma de vestir de la gente. Además, hasta el momento no son claros los efectos de los incrementos térmicos en la humedad atmosférica (relativa o absoluta), que es uno de los elementos climáticos más importantes en las evaluaciones del bioclima humano (Auliciems, 1992). Por otra parte, el llamado calentamiento global bien podría significar una reducción en las necesidades de calefacción en temporadas o regiones frías,

de las que un país tropical como México no está exento.

Este artículo muestra una manera sencilla de generar un escenario de condiciones bioclimáticas para ocho ciudades del sur de México (Tabla 1), que incorpora la aclimatación a través del uso del concepto de temperatura preferente. También se propone una forma estadística de estimar la humedad ambiente a partir de las predicciones de los modelos de circulación general. Como se verá más adelante, merced al aumento poblacional, los consumos energéticos para la segunda mitad del siglo XXI en estas ocho ciudades, deberán incrementarse para reducir las sensaciones de incomodidad térmica, tanto por "calor" como por "frío".

*Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, A. P. 465, Xalapa, Veracruz. E-mail: atejeda@uv.mx

** Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California.

Tabla 1. Ubicación geográfica de las estaciones climatológicas utilizadas

| Localidad | Longitud oeste | Latitud norte | Altitud (m) |
|----------------------------|----------------|---------------|-------------|
| <i>Transecto sur</i> | | | |
| Acapulco | 99°56' | 16°50' | 22 |
| Oaxaca | 96°43' | 17°04' | 1 550 |
| Tuxtla Gutiérrez | 93°07' | 16°45' | 536 |
| San Cristóbal de las Casas | 92°38' | 16°45' | 2 274 |
| <i>Transecto norte</i> | | | |
| Xalapa | 96°55' | 19°32' | 1 369 |
| Veracruz | 96°58' | 19°12' | 2 |
| Ciudad del Carmen | 91°50' | 18°39' | 3 |
| Chetumal | 88°18' | 18°30' | 9 |

Cambio climático y bioclima humano en México

Es de esperarse que los incrementos medios de temperatura bajo una condición de duplicación en la concentración de CO₂ disminuirán conforme aumenta la latitud, como lo muestran los escenarios de cambio climático para México generados por Magaña *et al.* (2000). Estos incrementos están alrededor de 2°C para México, y se obtienen de modelos de simulación climática de circulación general. Magaña *et al.* (2000) han utilizado los modelos del *Canadian Climate Center* (CCCM) y del *Geophysical Fluids Dynamics Laboratory* de los Estados Unidos (GFDL-R30). Desde luego, los escenarios climáticos regionalizados (para variables como temperatura y precipitación) pueden llegar a ser altamente especulativos, ya que el error potencial es grande, pues, entre otros, no están claros los efectos del cambio climático en la nubosidad (Hartmann, 1994, cap. 10).

Por otra parte, el incremento de la temperatura ambiente que experimentan los centros de las ciudades -conocido como "isla urbana de calor"- se intensifica y extiende en proporción directa al tamaño de las urbes (Oke, 1993), por lo que las ciudades de rápido crecimiento en los países en desarrollo -como es el caso de las estudiadas en

este trabajo (Figuras 1a y b)- tenderán a incrementar las condiciones de incomodidad por temperaturas y humedades altas (situaciones cálidas o muy cálidas), más notoriamente que como ocurre en las ciudades del centro de Europa (Unger, 1999).

Las consecuencias del calentamiento global sobre el bioclima urbano en Europa también han sido estudiadas por Auliciems (1992), quien sugiere que la emisión de gases radiactivos en los sistemas de enfriamiento utilizados en el verano en países industrializados puede contribuir más al calentamiento global. No obstante, en los países en desarrollo el uso de energía para aire acondicionado probablemente se mantenga bajo, ya que la población, generalmente con ingresos económicos escasos, intentará adaptarse a las nuevas condiciones térmicas, aclimatándose o cambiando su forma de vestir, en vez de gastar en sistemas de aire acondicionado. Si bien la cifra de mexicanos que actualmente usa aire acondicionado es difícil de estimar, se sabe que el 12% del consumo residencial de electricidad nacional corresponde a ese rubro (Rodríguez, 2002).

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 térmico humano en la región oceánica.

Para México existe el antecedente de trabajos que exploran el posible impacto de la duplicación de la concentración de CO₂ en el bioclima humano del país (Jáuregui *et al.*, 1996), de la Ciudad de México (Jáuregui y Tejeda, 2000 y 2001) y de cuatro ciudades

del sur del país (Tejeda y Rivas, 2001). El primero de ellos (Jáuregui *et al.*, 1996), apoyado en las proyecciones demográficas de Aguilar (1996), concluye que durante el verano de la segunda mitad del siglo XXI, 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 2). Esa información implica que para el verano el consumo energético por climatización de edificios habrá de triplicarse en comparación con la actualidad.

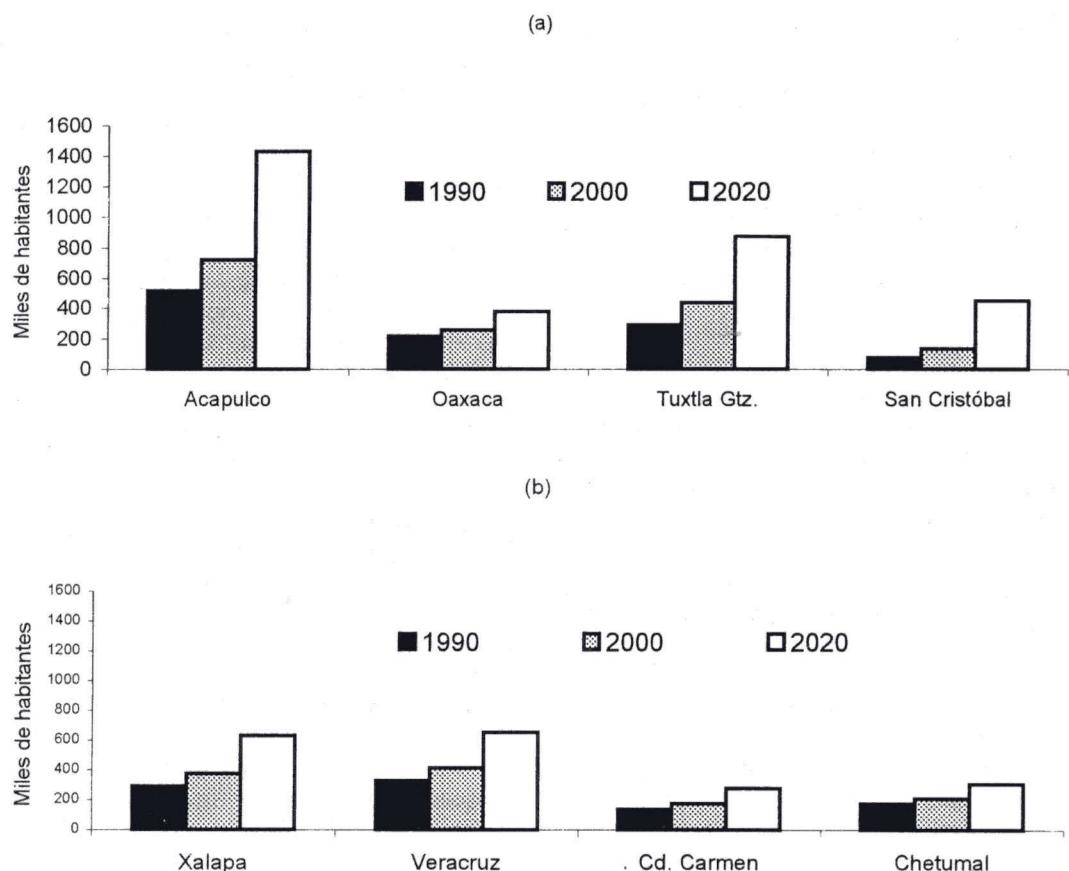


Figura 1. Poblaciones en los años 1990 y 2000, y estimadas para el 2020 para a) las ciudades del transecto sur y b) las ciudades del transecto norte.

Tabla 2. Incremento en millones de habitantes urbanos que estarían bajo situación cálida (media mañana a media tarde) hacia la segunda mitad del siglo XXI (Jauregui *et al.*, 1996)

| Región \ Mes | Enero | Abril | Julio | Octubre |
|---------------------------|-------|-------|-------|---------|
| Costas del Pacífico | 2 | 11 | 13 | 5 |
| Norte | 0 | 12 | 23 | 8 |
| Centro | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Costas del Golfo y Caribe | 2 | 10 | 12 | 12 |
| <i>Total</i> | 4 | 33 | 49 | 25 |

El objetivo de este trabajo es mostrar un escenario de las condiciones bioclimáticas a escala local para el sur de México (por debajo de los 20° N). El estudio se realizó para 18 urbes, pero se discutirán los resultados en las ocho ciudades de la Tabla 1, cuatro ubicadas en un transecto sobre el paralelo 17° N (Acapulco, Oaxaca, Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal de las Casas) y otras cuatro alrededor del paralelo 19° N (Xalapa, Veracruz, Ciudad del Carmen y Chetumal). Los perfiles altitudinales de ambos transectos se muestran en las Figuras 2a y b.

Las ocho ciudades seleccionadas presentan diversidades de tamaños, tendencias de crecimiento, condiciones altitudinales, climáticas, sujetas a la influencia de prácticamente los mismos sistemas meteorológicos, pero no de manera simultánea, por lo que pueden considerarse una muestra representativa de lo que podría ocurrir ante el cambio climático en las urbes mexicanas por debajo de los 20° N.

Termopluviosidad del sur de México

Los climas de la parte sur del país son por demás variados, con diferencias claras entre las costas pacífica y atlántica; entre las planicies bajas y las cimas de las sierras. Para no entrar en detalles que escapan al propósito de este artículo, en esta sección, como indicativo general, se esbozará la termopluvio-

viometría de las localidades analizadas.

En general, la oscilación anual de la temperatura -entendida como la diferencia entre las temperaturas medias de los meses más cálido y más frío- en ningún caso rebasa los 7° C, y para Acapulco apenas llega a 2.2° C. En cambio, el rango diurno es amplio en algunos casos (más de 14° C para San Cristóbal, Tuxtla Gutiérrez y Oaxaca).

En las Figuras 3a y b se muestran los promedios de temperaturas durante un mes de invierno (enero) y uno de verano (junio). Para el transecto sur, la ciudad de San Cristóbal de las Casas registra los promedios de temperatura mínima más bajos (4.1° y 10.2°C en enero y junio, respectivamente); para el mes de enero, el promedio de temperatura máxima más alto lo tiene la ciudad de Acapulco (31.0°C, casi igualado por Tuxtla Gutiérrez, con 30.4°C), mientras que durante junio el promedio de temperatura máxima más alto le corresponde a Tuxtla Gutiérrez (33.8°C). Salvo Acapulco, el resto de las localidades del transecto sur presentan una mayor oscilación térmica diaria media mensual (representada por la longitud vertical de las cajas en las Figuras 3a y b) que los sitios del transecto norte, mayoritariamente costeros. En Oaxaca y Tuxtla Gutiérrez la oscilación llega a ser de 20° C en enero, mientras que en ningún caso del transecto norte se alcanzan los 10° C.

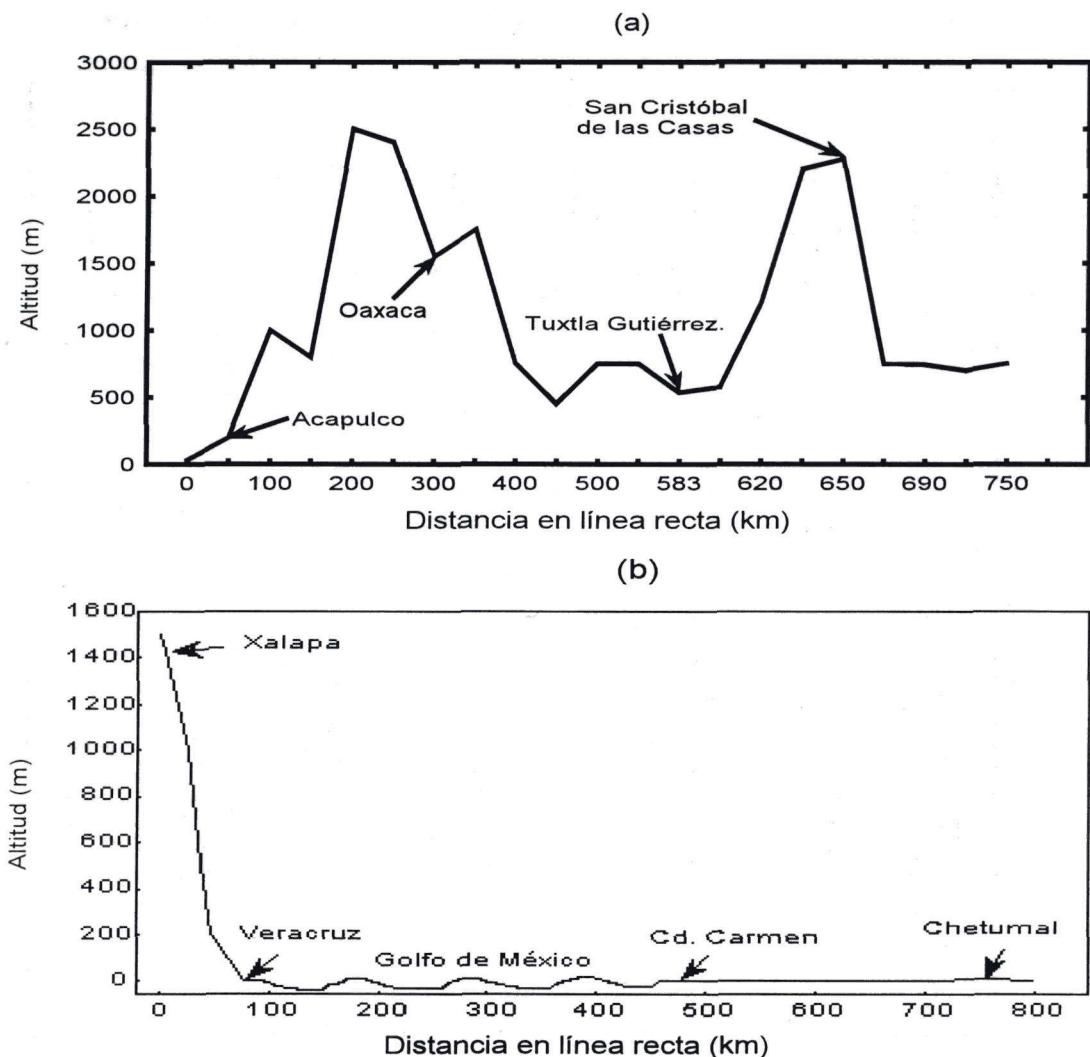


Figura 2. Corte de los transectos a) sur (alrededor del paralelo 17° N, que incluye a las ciudades de Acapulco, Oaxaca, Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal de las Casas) y b) norte (ligeramente al norte del paralelo 19° N, que incluye a las ciudades de Xalapa, Veracruz, Ciudad del Carmen y Chetumal).

Como se verá más adelante, esto ocasiona que las condiciones de comodidad térmica en las localidades del transecto norte sean más uniformes y que los requerimientos de climatización sean comparativamente menores. El sur del país se caracteriza por ser una zona con precipitaciones copiosas en verano

(semestre de mayo a octubre), que significan más del 70% de la lluvia anual. En el transecto sur las lluvias de verano en todos los casos son superiores al 90%, si bien Oaxaca tiene una precipitación anual de 607 mm y Tuxtla de 822 mm, mientras que San Cristóbal acumula 1 160 mm y Acapulco

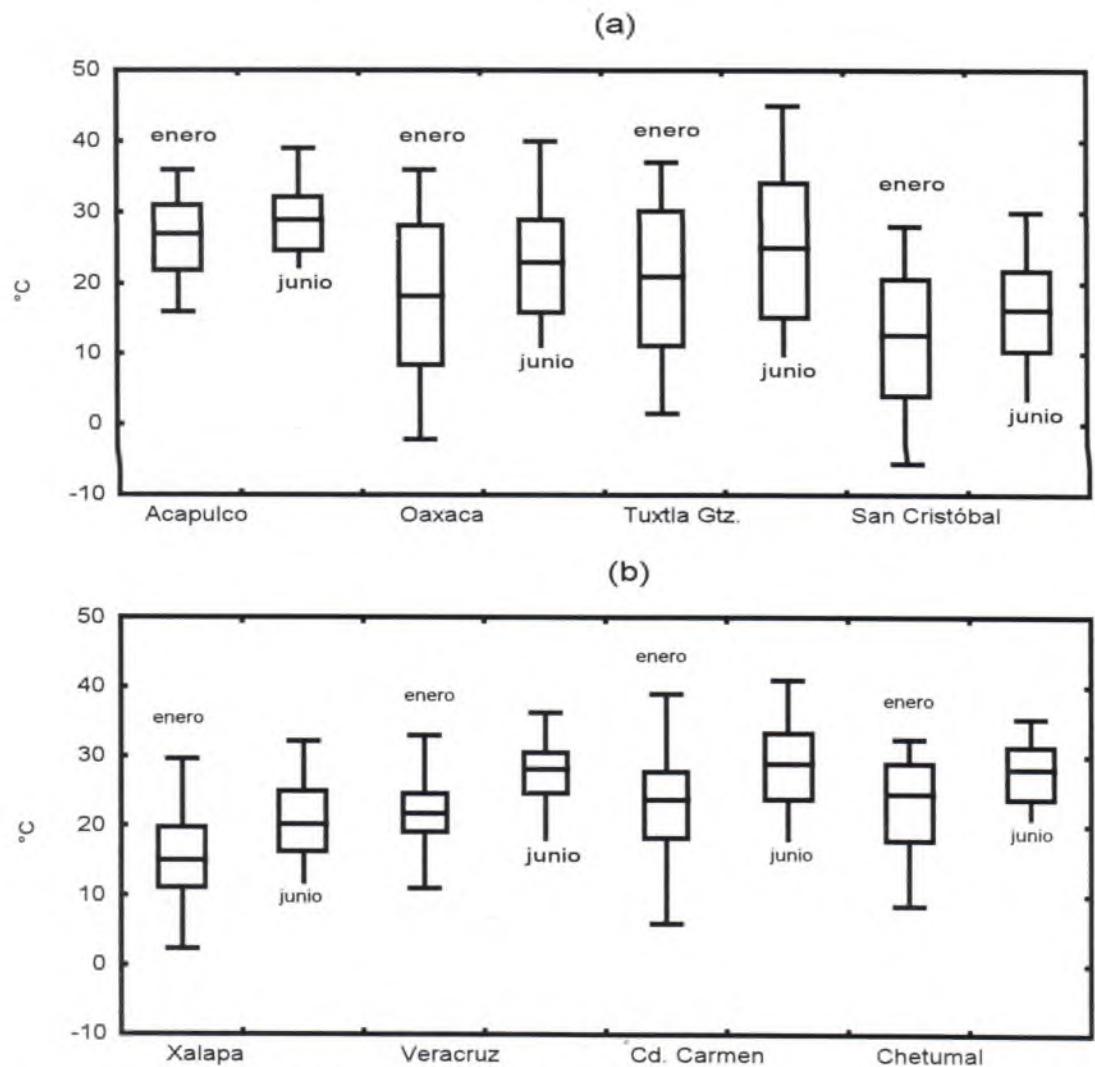


Figura 3. Gráfica de "cajas y alambres" de temperaturas en grados centígrados (1951-1980) para enero y junio para las localidades del transecto sur (a) y del transecto norte (b). El centro de la caja muestra las temperaturas medias; los promedios de máxima se indican mediante la cota superior y los promedios de mínima con la cota inferior de la caja. Las máximas y las mínimas extremas se señalan, respectivamente, con los límites superior e inferior de los "alambres".

1 404 mm. En el transecto norte las precipitaciones de verano son aproximadamente del 70%, excepto en el puerto de Veracruz, que concentra el 90% de la precipitación en este semestre. En este transecto se rebasan los 1 000 mm anuales (Veracruz llega a los

1 758 mm y Chetumal a los 1 091 mm). Para enero Tuxtla Gutiérrez es la menos (0.6 mm) y Xalapa la más lluviosa (45 mm; Figuras 4a y b); para junio Xalapa registra la media más alta (315 mm), y la menor corresponde a Ciudad del Carmen (145 mm).

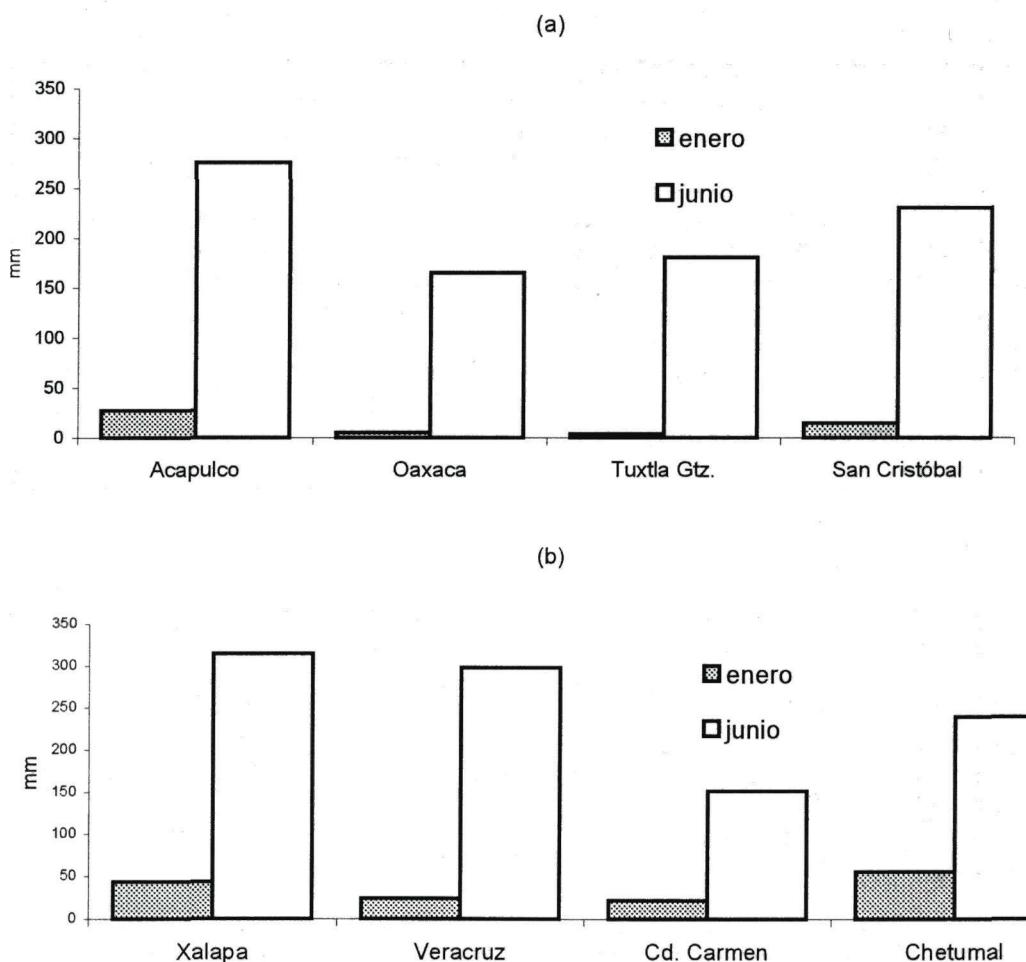


Figura 4. Precipitaciones medias mensuales en mm (1951-1980) para a) el transecto sur y b) el transecto norte.

El contraste más notorio entre los regímenes termopluviométricos de ambos transectos, lo generan las invasiones de masas de aire polar modificado en su tránsito sobre el Golfo de México, que provocan lluvias invernales importantes en el transecto norte, cercanas a los 50 mm en enero en los cuatro sitios, el doble o más que en cualquiera de las ciudades analizadas para el transecto sur. El mismo fenómeno meteorológico hace que la diferencia de temperaturas medias entre el mes más cálido y el más frío en el transecto

norte sea de 5.6° C en promedio, contra 3.5° C en promedio para el transecto sur.

LOS DATOS

Para este trabajo, los registros mensuales de temperatura media, mínima, máxima y humedad relativa promedio, estuvieron disponibles con calidad y sincronía para las estaciones climatológicas de la Tabla 1 durante el periodo 1951-1980 (Servicio Meteorológico Nacional, s/f), excepto que para Ciudad del

Carmen no se dispuso de información de humedad relativa. 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 y GFDL-R30 aplicados a México por Conde *et al.* (1996) y por Magaña *et al.* (2000). El modelo GFDL-R30 tiene una resolución de 2.22° de latitud y 3.75° de longitud, para iterar sus resultados sobre una malla de 96 por 80 puntos en nueve niveles altitudinales, mientras que el CCCM se desarrolla sobre 96 por 48 puntos de malla (resolución de 3.75° por 3.75° en cinco niveles altitudinales). Para una duplicación de bióxido de carbono, el primero pronostica un incremento térmico planetario promedio de 4°C y el segundo de 3.5°C.

Sin embargo, puesto que ambos modelos arrojaron resultados similares de incremento de temperatura media para el sur del país (entre 1.7° y 2.7°C), se adoptó el valor más bajo para la estimación de la temperatura esperada para condiciones de duplicación en la concentración de CO₂ (Tabla 3), lo cual posiblemente ocurría hacia la segunda mitad del siglo XXI (SEMARNAT-INE, 2001).

La población registrada para cada una de las ciudades, tomada de los censos generales de población de 1990 y del año 2000, permitió obtener la tasa de crecimiento poblacional para pronosticar el número de habitantes para el año 2020 (Figuras 1a y b). Para

estimar el número de habitantes que las poblarán cuando ocurra la duplicación de CO₂, se adoptó como hipótesis arbitraria que a partir del año 2020 la población se mantendrá constante. De esta manera, se resolvió la dificultad de precisar una fecha de ocurrencia del doblamiento de CO₂ respecto de las concentraciones en la última década del siglo XX. Esto implica, igualmente, que la llamada isla urbana de calor cesará de intensificarse hacia ese año (2020).

Es de notarse en las Figuras 1a y b, que para el año 2020 Acapulco rebasará el millón de habitantes y Tuxtla Gutiérrez se acercará a esa cifra, mientras que Xalapa y Veracruz se acercarán a los 700 mil habitantes. Estos valores deben tomarse con reserva, pues ante la dificultad de considerar áreas conurbadas y su evolución futura, se optó por tomar los datos de los municipios en lugar de únicamente el de las ciudades, considerando que la población municipal sea aproximadamente equiparable a la de las zonas conurbadas pertenecientes a dos o más municipios, como en los casos claros de Xalapa, Veracruz y Acapulco.

MÉTODO

En la literatura es posible encontrar una amplia variedad de índices para evaluar el bioclima humano (para una revisión véase Taesler, 1986; Jáuregui, 1996 y Hóppé, 1997). Los hay tan complicados como los que pretenden una simulación de las con-

Tabla 3. Incrementos estimados de la temperatura media mensual (o C) en el sur del país, de acuerdo con el modelo CCCM, según Magaña *et al.* (2000)

| Localidades\Meses | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Acapulco y Oaxaca | 1.8 | 2.0 | 1.8 | 2.1 | 2.1 | 1.9 | 2.0 | 2.2 | 2.2 | 2.5 | 2.4 | 2.1 |
| Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal | 1.9 | 2.2 | 1.9 | 2.3 | 2.2 | 2.0 | 2.1 | 2.3 | 2.3 | 2.6 | 2.4 | 2.2 |
| Veracruz y Xalapa | 1.6 | 1.8 | 1.7 | 2.1 | 2.1 | 1.8 | 1.9 | 2.1 | 2.1 | 2.4 | 2.3 | 1.9 |
| Ciudad del Carmen y Cozumel | 1.9 | 2.0 | 1.8 | 2.1 | 2.1 | 2.0 | 2.0 | 1.9 | 2.0 | 2.3 | 2.1 | 2.1 |

diciones físicas y fisiológicas presentes en la sensación de confort de los humanos, y en el otro extremo están los índices sencillos que usan como datos de entrada sólo la temperatura ambiente y la humedad atmosférica. Sin embargo, los primeros no son aplicables a la generación de escenarios de bioclima humano ante el cambio climático, porque los modelos climáticos de circulación general o de balance de energía producen como datos de salida temperatura ambiente y precipitación, eventualmente insolación y casi nunca humedad atmosférica. Por otra parte, Jáuregui *et al.* (1997) han mostrado que cuando en un índice complejo se parametrizan algunas de las variables, ese índice adquiere la misma sensibilidad y utilidad que un índice sencillo. Por esa razón siguen siendo vigentes las evaluaciones bioclimáticas a partir de datos de temperatura y humedad, más aún cuando hay dificultad para conseguir información climática más específica, como datos de horarios de viento, radiación solar, temperatura radiante, entre otros, como ocurre para los países tropicales (Tejeda y García, 2002) o en las salidas de los modelos de cambio climático. Pero incluso en regiones del mundo donde son accesibles datos climáticos densos, continuos y de otras variables, además de humedad y temperatura, se siguen aplicando índices sencillos para fines de comparaciones bioclimáticas, como por ejemplo en Grecia (Tselepidaki *et al.*, 1992), en el centro de Europa (Unger, 1999) o en California, Estados Unidos (Cesaraccio *et al.*, 2001).

Por lo anterior, se escogió usar en este trabajo la temperatura efectiva (*TE*), definida 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%. El uso de este índice resulta sumamente atractivo por su simplicidad (Hentschel, 1987), aunque ha sido criticado porque pierde sensibilidad ante la humedad elevada en los climas cálidos (Tromp, 1980).

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 sólo de datos de temperatura y humedad relativa; la primera se puede obtener de los modelos de cambio climático y, para los datos de humedad relativa en condiciones de duplicación de la concentración de CO₂, se mostrará aquí un procedimiento de parametrización.

La ecuación de *TE* propuesta por Missenard (1937) es:

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

donde *Ta* es temperatura del aire en grados centígrados y *f* es la humedad relativa en décimas.

Estimación del bioclima 1951-1980

Para estimar la *TE* es necesario contar con valores medios mensuales de temperatura y humedad relativa (*T* y *f* respectivamente). En el caso de Ciudad del Carmen no se contó con el registro de humedad media mensual, por lo que hubo que estimarla aplicando las ecuaciones 2, 3 y 4.

Primero, para el periodo 1951-1980 se calculó la presión de vapor *e* (hPa) promedio mensual mediante una ecuación de regresión polinomial de quinto grado:

$$e = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i (Tmin)^i \quad (2)$$

con

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

donde *Tmin* es el promedio mensual de temperatura mínima en grados centígrados. 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:

$$f = \frac{e}{e_s} \quad (3)$$

donde la presión de vapor de saturación e_s (en hPa) se calculó con la ecuación de Adem (1967):

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

con $b_0 = 6.115$, $b_1 = 0.42915$, $b_2 = 1.4206 \times 10^2$, $b_3 = 3.046 \times 10^4$, $b_4 = 3.2 \times 10^6$.

A partir de la humedad relativa media mensual se procedió a estimar los valores promedio mensuales de humedad relativa máxima (f_{max}) y mínima (f_{min}). 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 a 15 horas locales) será entonces:

$$f_{min} = \frac{e}{e_{s\ max}} \quad (5)$$

donde e es la presión de vapor promedio mensual y $e_{s\ max}$ es la presión de vapor de saturación máxima. Esta fue calculada de acuerdo con la ecuación (2) aplicada a la temperatura promedio mensual máxima (T_{max}):

$$e_{s\ max} = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i (T_{max})^i \quad (6)$$

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:

$$f_{max} = 2f - f_{min} \quad (7)$$

Los valores horarios medios mensuales de temperatura ($Thor$) y de humedad relativa ($fhor$) se obtuvieron a partir de las ecuaciones exponenciales siguientes:

$$Thor = T_{min} + (a t^b e^{ct}) (T_{max} - T_{min}) \quad (8a)$$

$$fhor = f_{min} + (1 - a t^b e^{ct}) (f_{max} - f_{min}) \quad (8b)$$

La ecuación (8a) tiene un error estándar de estimación de $1.3^\circ C$ y un coeficiente de correlación de 0.91, al comparar con datos observados de temperatura ambiente en diez localidades de México. Los valores de las constantes son $a=0.096$, $b=2.422$, $c=-0.339$, e es la base de los logaritmos naturales y t es la hora del día medida a partir del amanecer (Tejeda, 1991).

En este trabajo la expresión (8a) se adaptó para estimar datos horarios medios mensuales de humedad relativa (ecuación 8b), a partir del hecho de que la humedad relativa sigue una marcha diaria inversa a la de la temperatura ambiente (Tejeda y García-Cueto, 2002).

La ecuación (8a) se aplicó a la TE para estimar sus valores horarios medios mensuales ($TEhor$):

$$TEhor = Thor - 0.4(Thor - 10)(1 - fhor) \quad (9)$$

Posteriormente se calcularon los cuatro promedios estacionales ($TEest$) de $TEhor$. Estos valores fueron utilizados para calcular la TE preferente estacional, a partir de extender el concepto de temperatura preferente aplicado originalmente por Auliciems (1992) a la temperatura ambiente:

$$TEp = 17.6 + 0.31(TEest) \quad (10)$$

Finalmente, la zona de confort se definió como:

$$ZC = TEp \pm 2^\circ C \quad (11)$$

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*) a la temperatura efectiva de cada hora durante un día promedio para alcanzar el confort, considerando que éste abarca un intervalo de 2° C alrededor de la temperatura efectiva preferente (Ecuación 11):

$$HGC = \sum [TE_p - 2^\circ C] - TE_{hor}, \\ \text{si } TE < (Tep - 2^\circ C) \quad (12a)$$

$$HGF = \sum [TE_{hor} - (TE_p + 2^\circ C)], \\ \text{si } TE > (Tep + 2^\circ C) \quad (12b)$$

A partir del dato de población total en cada ciudad se obtuvieron las necesidades de calefacción (*CQ*) y de enfriamiento (*CE*), en *HGC* y *HGF*, por el total de habitantes:

$$CQ = (HGC) * P_{1990} \quad (13a)$$

$$CE = (HGF) * P_{1990} \quad (13b)$$

donde *P*₁₉₉₀ es la población en el año 1990.

Para la segunda mitad del siglo XXI, se calculó la tasa media anual de crecimiento de población (*k*) correspondiente al periodo 1990-2000, de acuerdo con el método del INEGI (2001):

$$k = \left(\frac{P_{2000}}{P_{1990}} \right)^{\frac{1}{5}} - 1 \quad (14)$$

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 a la población para la segunda mitad del siglo XXI:

$$P_{2020} = P_{1990} e^{kt} \quad (15)$$

donde *Dt* es el periodo 1990-2020, es decir, 30 años (véanse Figuras 1a y b).

Escenario para condiciones de 2CO₂

Para un escenario de duplicación en la concentración de CO₂, Magaña *et al.* (2000) muestran que los incrementos medios regionalizados de temperatura media mensual en grados centígrados esperados para el sur del país, a partir del modelo CCCM, ocurren como se muestra en la Tabla 3. Se tomaron los incrementos de este modelo por ser menores a los arrojados por el GFDL-R30 y, por lo tanto, generan escenarios más conservadores. A partir de dichos valores se obtuvieron los promedios de temperatura máxima y mínima para condiciones de duplicación de bióxido de carbono:

$$T_{min,2CO_2} = T_{min} + \Delta T \quad (16a)$$

$$T_{max,2CO_2} = T_{max} + \Delta T \quad (16b)$$

donde *AT* es el incremento de temperatura correspondiente al modelo CCCM tomado de la Tabla 3.

Finalmente, se rehicieron las estimaciones y cálculos descritos por las ecuaciones 1 a 13 (a y b) utilizando como datos de entrada las temperaturas derivadas con la ecuación (16) y con el valor de *P*₂₀₂₀ en lugar de *P*₁₉₉₀ dando como resultado los escenarios de bioclima y población para condiciones de duplicación del CO₂ atmosférico que se comentarán a continuación.

RESULTADOS

Las Figuras 5a y b muestran que, sin considerar los incrementos poblacionales, localidades de climas cálidos como Acapulco, Tuxtla Gutiérrez, Ciudad del Carmen y Chetumal requerirán un incremento en sistemas de enfriamiento de un 100% o hasta de un 200% para Veracruz, mientras que Oaxaca y Xalapa, templadas actualmente (es decir, con requerimientos de enfriamiento y de calefacción relativamente bajos), vivirían una situación cálida inédita.

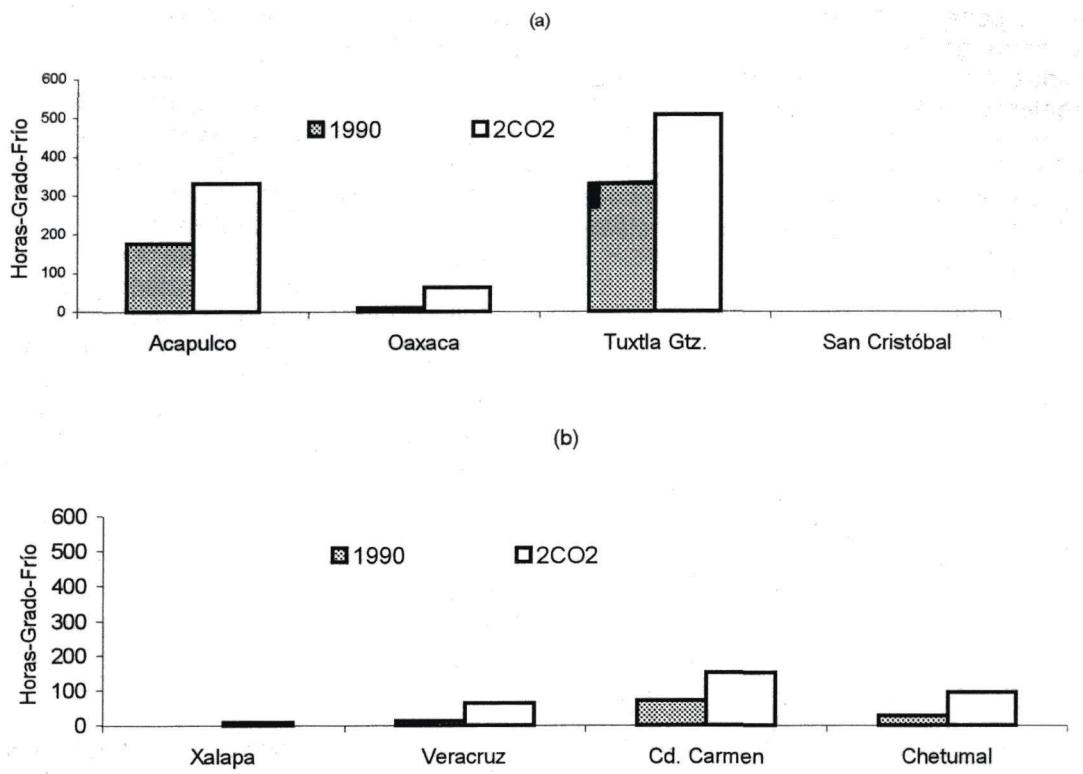


Figura 5. Necesidades anuales de enfriamiento a) en ciudades del transecto sur, y b) en ciudades del transecto norte.

Las necesidades de calefacción se reducirán para ambos transectos (Figuras 6a y b), excepto para Tuxtla Gutiérrez. El pequeño incremento para esta ciudad 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 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 Oaxaca, Xalapa y, sobre todo, en San Cristóbal, donde tanto ahora como en un escenario de cambio climático, por momentos es necesaria la calefacción.

Por otra parte, el incremento poblacional y térmico aunados significa que las necesida-

des de aire acondicionado pueden incrementarse en un 500% en los casos de Acapulco, Tuxtla Gutiérrez, Veracruz, Ciudad del Carmen y Chetumal (Figuras 7a y b), mientras que el impacto del cambio climático en la reducción de calefacción es rebasado por el incremento de población (Figuras 8a y b), excepto en Acapulco, Veracruz, Ciudad del Carmen y Chetumal, cuyas necesidades de enfriamiento mínimas para una persona a la intemperie, prácticamente se ven abatidas por los incrementos térmicos inducidos por el cambio climático. Hay que notar que la menor oscilación térmica diaria del sector norte y su menor explosión demográfica (Figuras 1a y b), inducen menores incrementos energéticos para finales del siglo XXI, comparativamente con el transecto sur (Figuras 7a, b, y 8a y b).

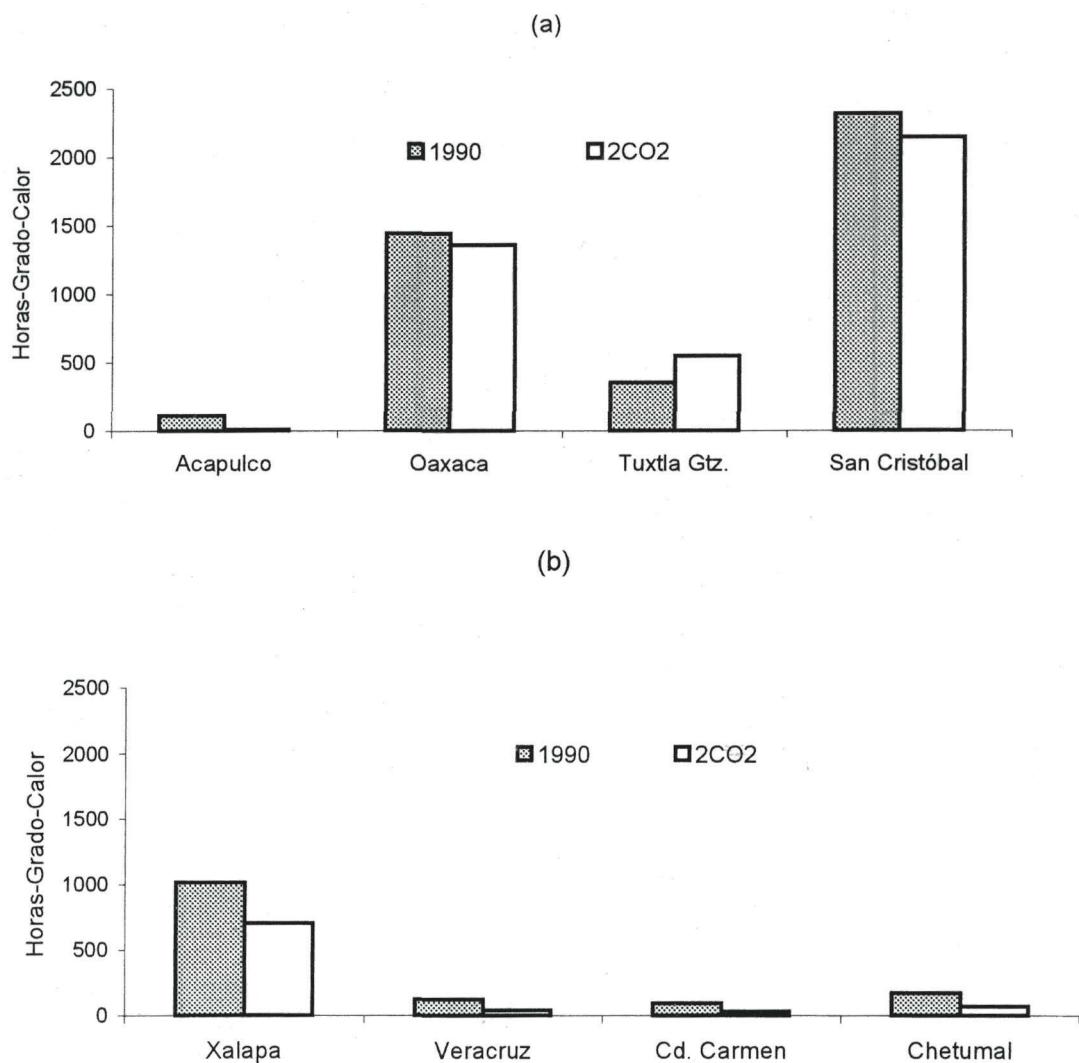


Figura 6. Necesidades anuales de calefacción a) transecto sur, y b) transecto norte.

Por último, debe enfatizarse que las necesidades de calefacción estimadas para condiciones de uno o dos CO₂ en buena medida se pueden reducir por el abrigo que proporcionan las edificaciones y la ropa. En cambio, los requerimientos de enfriamiento estimados aquí son conservadores toda vez que en este trabajo no está incluida la actividad de los sujetos, que induce a mayores inco-

midades en períodos diurnos con temperaturas y humedades elevadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración en la preparación final de este trabajo a Irving Méndez-Pérez, Gerardo Utrera-Zarate y Berenice Tapia.

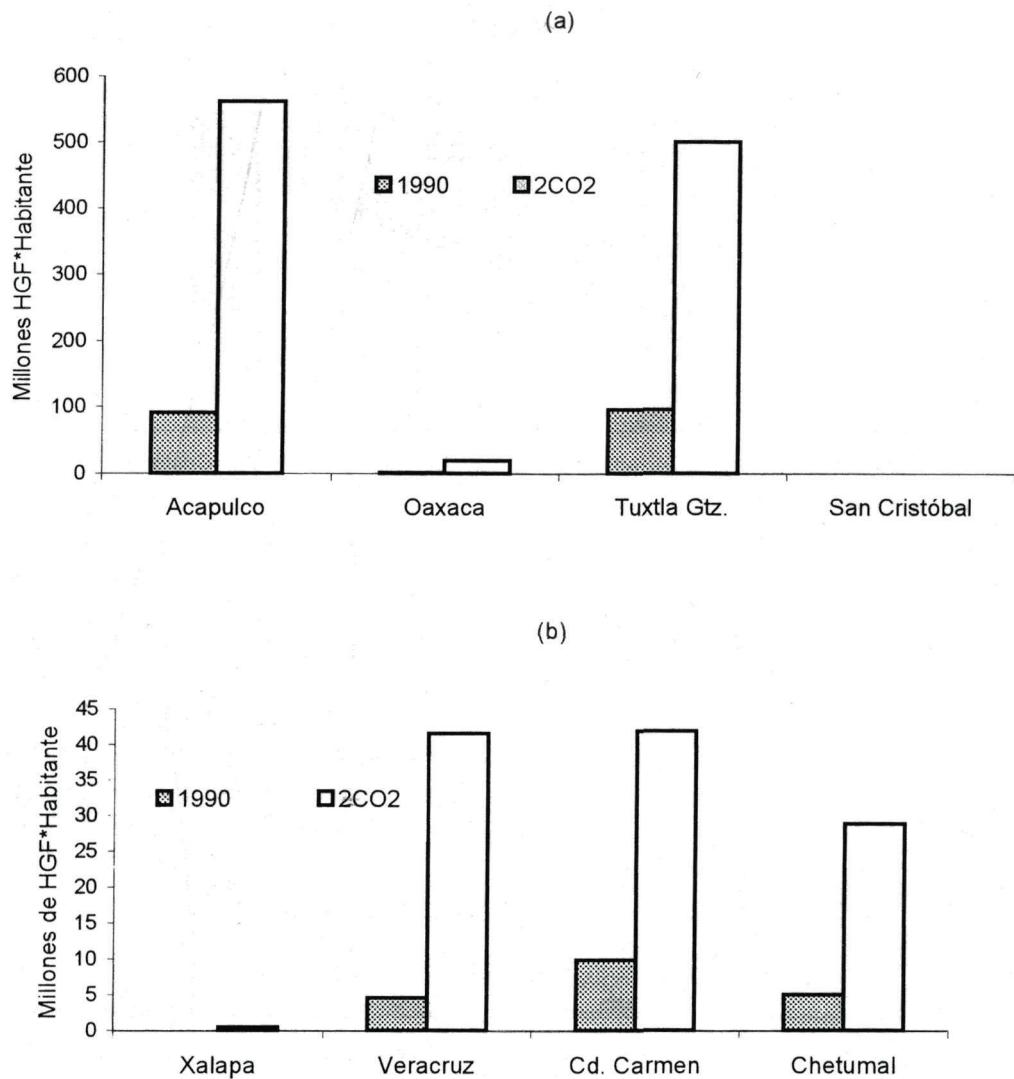


Figura 7 Necesidades anuales de enfriamiento multiplicadas por la población a) en ciudades del transecto sur, y b) en ciudades del transecto norte.

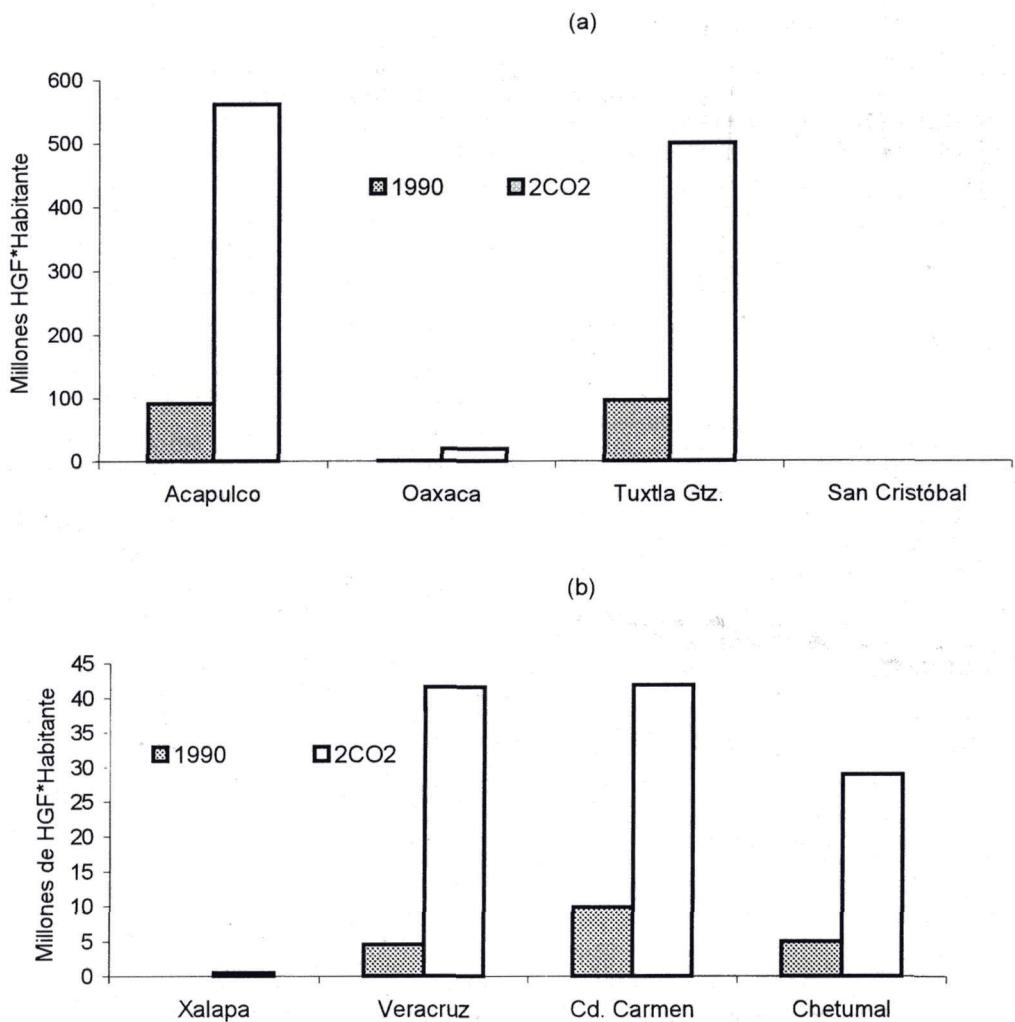


Figura 8. Necesidades anuales de calentamiento multiplicadas por la población
a) transecto sur y b) transecto norte.

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 humanos en México. Condiciones de vulnerabilidad al cambio climático", en *Memorias del 2º Taller de estudio de país: México*, pp. 243-250.

□ Auliciems, A. (1992), "Greenhouse warmed Europe: thermoregulatory criteria for future indoor climate management", *Int. J. Biometeorology*, 36:201-209.

□ Cesaraccio, S., D. Spano, P. Duce y R. L Snyder. (2001), "An improved model for determining degree-day values from daily temperature data", *Int. J. Biometeorology*, 45, pp. 161-169.

- Conde, C., O. Sánchez, V. Magaña y C. Gay (1996), "Escenarios básicos y regionales", en *Memorias del 2º Taller de estudio de país: México*, pp. 101-112.
- Geiger, R. (1957), *The climate near the ground*, Harvard University Press, Cambridge.
- Hartmann, D. L. (1994), *Global physical climatology*, Academic Press
- 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, pp. 120-138.
- Hoppe, P. (1997), "Aspects of human biometeorology in past, present and future", *Int. J. Biometeorology*, 40:19-23.
- Houghton, F. C. y C. P. Yaglou (1923), "Determining lines of equal comfort", *Trans. Am. Soc. Heat Vent. Eng*, 29:163-176.
- INEGI (2001), *XI Censo General de Población y Vivienda 1990 y XII Censo General de Población y Vivienda 2000*, <http://www.inegi.gob.mx>
- Jáuregui, E. (1996), "Aspects of urban human biometeorology", *Int. J. Biometeorology*, 40, pp. 58-61.
- Jáuregui, E., A. Ruiz, C. Gay y A. Tejeda (1996), "Una estimación del impacto de la duplicación del CO₂ atmosférico en el bioclima humano de México", en *Memorias del 2º Taller de estudio de país: México*, pp. 219-246.
- Jáuregui, E., J. Cervantes y A. Tejeda (1997), "Biomimetic conditions in México City: an assessment", *Int. J. of Biometeorology*, 40, pp. 166-177.
- Jáuregui, E. y A. Tejeda (2000), "Un escenario de las condiciones bioclimáticas de la Ciudad de México para una duplicación en la concentración de CCV", en Gay, C. (comp.), *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*, México, pp. 195-211.
- Jáuregui, E. y A. Tejeda (2001), "A scenario of human thermal comfort in México city for 2CO₂ conditions", *Atmósfera*, 14:125-138.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez y C. Gay (2000), "Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México", en Gay, C. (comp.), *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*, México, pp. 15-21.
- McGregor, G. R. (1995), "The human bioclimates of Western South Pacific islands and climate change", *Int. J. of Biometeorology*, 39, pp. 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, Canadá, pp. 123-134.
- Rodríguez-Viqueira, L. (2002), *Consumos energéticos en México*, manuscrito inédito.
- SEMARNAT-INE (2001), *México: primera comunicación ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- Servicio Meteorológico Nacional (s/f), *Normas climatológicas 1951-1980* (fotocopias).
- Taesler, R. (1986), "Climate characteristics and human health -the problem of climate classification", *Proceed. Symp. on climate and human health WMO*, Leningrad, pp. 81-119.
- Tejeda, A. (1991), "An exponential model of the curve of mean monthly air temperature", *Atmósfera*, 4:139-144.
- Tejeda-Martínez, A. y D. Rivas-Camargo (2001), "Un escenario de bioclima humano en ciudades del sur de México, bajo condiciones de 2CO₂ atmosférico", en Pérez-Cueva, A. J., E. López-Baeza y J. Tamayo-Carmona (eds.), *El tiempo del clima*, Asociación Española de Climatología, Serie A, núm. 2, 574 pp. 551-562.
- Tejeda, A. y R. García-Cuetos (2002), "A comparative simple method for human", *Atmósfera*, 15, pp. 55-66.
- Tromp, S. (1980), *Biometeorology*, Heyden, London.
- Tselepdaki, I., M. Santamouris, C. Moustris y G. Poulopoulou. (1992), "Analysis of the summer discomfort index in Athens, Greece, for cooling purposes", *Energy and building*, 18:51-56.
- Unger, J. (1999), "Comparisons of urban and rural bioclimatological conditions in the case of a Central-European city", *Int. J. Biometeorology*, 43:139-144.