

**Título:****EVALUACIÓN DE LA ADAPTABILIDAD DE LOS EDIFICIOS AL CLIMA  
USANDO EL CONCEPTO DE TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO  
LIBRE****Autor:****Luis A. Rosales S.**

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción, IDEC

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Universidad Central de Venezuela

luisrosalesucv@gmail.com

**Descripción:****INTRODUCCIÓN**

El funcionamiento de los edificios terciarios y las actividades que en ellos se realizan significan en la actualidad cerca de la mitad del consumo energético mundial (Usón, 2005, 12; Holmberg *et al.*, 2008). Al mismo tiempo la población urbana crece, lo que lleva a que cada vez haya más edificios acoplados a los servicios modernos y más gente haciendo uso de ellos: más de la mitad de la población mundial vive hoy en ciudades y se estima que en el 2030 lo hará el 70% (FPNU, 2007). Si se relaciona lo anterior con el problema del cambio climático, por un lado, y la aspiración de las poblaciones que se insertan en la economía global de adecuar su nivel de vida a los estándares de consumo modernos, por otro, se entiende la importancia de coligar el diseño arquitectónico al paradigma de desarrollo sostenible. Ello conlleva adelantar acciones en diversos ámbitos, siendo uno de ellos el de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i).

Un tipo de acción concreto es la propuesta de métodos de ayuda al diseño arquitectónico orientados a cumplir con el criterio de confort térmico que puedan usarse en las primeras etapas de un proyecto, cuando se definen los principales atributos del edificio. Cuanto más al inicio se pueda usar un método, más genérico será, pero mayor será su peso en la solución del criterio de confort (Altavilla *et al.*, 2004; Zeiler *et al.*, 2008). Esta singularidad se debe a que el diseño arquitectónico se presenta como un problema abierto al inicio y un afinamiento de detalles al final, siendo las primeras decisiones las que fijan los atributos básicos de la obra arquitectónica. A medida que transcurre el proceso, la comprensión de los problemas que se presentan aumenta, así como la disponibilidad de soluciones, pero, en contrapartida, disminuye la libertad de decisión (Ullman, 2003, 17, 18).

La dificultad de plantear métodos que orienten la toma de decisiones en las etapas iniciales es justamente la indefinición del edificio. Todo método que intente predecir la calidad térmica de un edificio debe, por definición, acoplar en su análisis tres elementos: el clima, el criterio de confort térmico y el edificio. Es la interacción entre el clima y el edificio (incluyendo en la caracterización del edificio la influencia de las actividades que se realicen en él) lo que determina su conformidad con las condiciones normativamente preestablecidas de confort. De no conocerse el edificio, cualquier pronóstico debe suponerlo, así sea vagamente. De ahí la tendencia actual a suspender la justificación de las decisiones dudosas hasta llegar a las etapas finales ligadas a la simulación computarizada comprobatoria, la cual demanda de un edificio lo suficientemente acabado como para caracterizarse matemáticamente. Esto lleva lógicamente a un proceso de ensayo y error pocas veces cuestionador de las decisiones iniciales.

La fuerte relación entre la etapa en que se esté en el proceso de diseño y la naturaleza de los métodos aplicables justifica diferenciar dichos métodos con arreglo a ese criterio antes que otro. Tal diferenciación pudiera resumirse en *métodos iniciales*, *métodos intermedios* y *métodos finales* (Saberri *et al.*, 2006). Los primeros son aquellos que comprenden las etapas de estudio preliminares y el planteamiento de alternativas mediante esquemas básicos. En este grupo se encuentran, primero, aquellos que dan pautas sólo con base en la relación entre el clima y el criterio de confort y se expresan en términos de estrategias genéricas globales. Entre ellos se pueden mencionar los métodos de los grados-día y los grados-hora (ASHRAE, 2009, 14.6-14.7) y el diagrama bioclimático de Olgay (1963), basados en la hipótesis de la similitud inicial de las condiciones exteriores e interiores. Segundo, aquellos métodos en los que ya se presupone, aunque de manera muy genérica, la respuesta de edificios en los que se acentúen ciertas estrategias generales de diseño de la envolvente, como los diagramas bioclimáticos de Givoni (1969) y Szokolay (1987). En ellos las *distancias corregibles* entre malestar y confort están dadas por la temperatura y la humedad exterior. Tercero, aquellos que dan recomendaciones relativas a los volúmenes, la orientación, el plan masa, los rasgos generales de las fachadas y, en general, cualquier decisión que se exprese en términos de modelos iniciales simples (Sosa *et al.*, 2004; Comisión para el Mejoramiento de la Calidad Térmica de las Edificaciones y el Espacio Urbano, 1999; Reardon *et al.*, 2001). Los métodos intermedios, bien que deban hacer aún abstracción de los edificios, se presentan como supuestos de casos, ejemplos de diseño, especificaciones y recomendaciones basadas en la experiencia, estudios paramétricos experimentales o simulados, problemas relativos a componentes determinados, estrategias y evaluaciones de problemas típicos, etc. Al buscar caracterizar la innumerable cantidad de potenciales situaciones, ellos mismos son numerosos y variados. Los mismos atañen las etapas en que los rasgos más generales del edificio ya están definidos y se procede a pormenorizarlos (definiciones a escala 1:100 y 1:50) (ASHRAE *Advanced Energy Design Guides*<sup>1</sup>). Los métodos finales

---

<sup>1</sup> ASHRAE (*The American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*) ofrece gratuitamente guías específicas para varios tipos de edificios tales como escuelas, oficinas, comercios, clínicas, viviendas, etc., todas las cuales están disponibles en: <http://www.ashrae.org/technology/page/938>

son en cambio de carácter analítico, en cuanto a que modelan el edificio y los procesos energéticos a fin de predecir, con base en una propuesta concreta, el comportamiento de la misma. Entre ellos dominan hoy los programas de simulación computarizada (Crawley *et al.*, 2005; 2008).

Una orientación actual interesante tiende a relativizar la compartimentación de los tipos de métodos al plantearse la sistematización computarizada de toda información relevante generada con cualquiera de ellos. Esta orientación, conocida como Modelado de información de edificios (*Building Information Modeling*, BIM), ambiciona reproducir en computadora el edificio, su prestación y sus evoluciones (incluyendo su concepción), reuniendo y clasificando en unidades de tipo objetos toda componente e información utilizable o relevante, de forma que el arquitecto disponga de ellos cuando lo necesite (Seletsky, 2005; Malin, 2007). Esta perspectiva se inspira en el mismo paradigma que ha llevado a desarrolladores de software a desechar los modelos numéricos detallados y ofrecer métodos de simulación simplificados de respuesta rápida, acompañados de métodos iniciales e intermedios de apoyo al diseño, de forma que la modelización gane en interactividad y pueda utilizarse en la concepción del edificio (Hobbs *et al.*, 2004; Marsh, 2004; Obanye, 2006; Khemlani, 2009).

Lo anterior amplía el alcance de toda información que pueda considerarse útil en cualquier etapa del proceso de diseño. Una posibilidad es usar los programas de simulación tradicionalmente usados en las etapas finales de comprobación para producir información que pueda ser usada en las etapas iniciales o intermedias. Esto incluye no sólo estudios paramétricos y análisis de sensibilidad orientados a presentar de forma sencilla indicaciones genéricas relacionadas con ciertas decisiones de diseño (regresiones, ábacos, tablas, sistemas de puntuación, etc.), sino análisis estadísticos de los resultados de la simulación orientados a identificar patrones de comportamiento simples que puedan desligarse del caso simulado y describir casos genéricos asociables a muchas situaciones (Shaviv *et al.*, 2001; Pfafferott *et al.*, 2003, 2005; Ghiaus, 2006; Breesch y Janssens, 2010).

En esta onda se propone un método que se deriva de aplicar bajo ciertas hipótesis ligadas al concepto de temperatura de funcionamiento libre (Ghiaus, 2003) modelos de regresión lineal simple a los resultados de la simulación, con lo que se logra desacoplar al edificio simulado del clima en el que se le simuló, quedando caracterizado por dichas regresiones. La caracterización mediante regresiones simples de un *edificio tipo* y de edificios que resulten de aplicar en él cambios genéricos orientados a adaptarlo al clima, superpuesta a la caracterización, en los mismos términos, del criterio de confort, es ese tipo de información que resulta de gran utilidad en las etapas iniciales, pues permite apreciar, a simple vista, a qué horas y para qué temperaturas exteriores cada alternativa tendrá condiciones de confort; en otras palabras, permite apreciar cuál es su grado de adaptación a un clima. En lo que sigue se explica de manera resumida el método en cuestión y se presenta un ejemplo de aplicación de cómo se puede, usando la información que se deriva de dicho método, cuantificar de manera simple (sin simular) y en términos de grados-hora de malestar térmico, el grado de adaptación de una propuesta genérica a diferentes tipos de clima.

## **RESUMEN DEL MÉTODO. CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA: CONFORT, EDIFICIO Y CLIMA**

### ***El criterio de confort térmico. Una caracterización basada en la adaptación***

El confort térmico en edificios constituye un campo del conocimiento en cuyo marco se han desplegado dos grandes programas de investigación, uno inspirado en una aproximación analítica del problema y el otro en una aproximación empírica sistematizada en términos estadísticos. El primero se basa en la ecuación de balance térmico del cuerpo humano y está avalado en laboratorio y el segundo se basa en la noción intersubjetiva de adaptación y está avalado *in situ*. Los índices de confort normativizados más importantes que se derivan del primer enfoque son la *temperatura efectiva*, de la norma ASHRAE 55, y el índice de Fanger o PMV, de las normas ISO 7730 y ASHRAE 55. De los que se derivan del segundo enfoque, los más importantes son el modelo de regresión lineal para edificios con ventilación natural de la norma ASHRAE 55 y el modelo para edificios en funcionamiento libre de la norma europea EN 15251 (la aplicabilidad de éste se limita al contexto europeo, por lo que no será tratado en lo que sigue).

Dadas una humedad, una actividad y una vestimenta, los índices de la temperatura efectiva estándar y el PMV permiten relacionar los valores que pueda tomar la temperatura operativa<sup>2</sup> con la sensación térmica. Esta relación es considerada universal, es decir, no dependiente de factores de contexto distintos a la actividad y la vestimenta. Al haberseles derivado racionalmente y validado en laboratorio, estos índices desprecian las variables de contexto que no puedan considerarse desde esa perspectiva (o cuya consideración resulte demasiado complicada desde esa perspectiva). El resultado es que su aplicabilidad se restringe a condiciones ambientales moderadas o controladas.

Por su parte, el modelo de regresión lineal de la norma ASHRAE 55 condiciona la temperatura operativa de neutralidad térmica al clima del sitio, descrito por la temperatura media mensual. Los demás parámetros ligados a la adaptación quedan implícitos en los rangos de aceptación. La única condición para aplicar este índice es que el edificio funcione con ventilación natural.

Los rangos de aceptación son más amplios en edificios con climatización natural que en edificios con climatización activa. Para una *aceptabilidad* del 80% de las personas, la zona de confort basada en el PMV admite variaciones alrededor de la temperatura operativa de neutralidad de sólo  $\pm 1,5$  °C en verano (actividad sedentaria y ropa ligera) y  $\pm 2$  °C en invierno (actividad sedentaria y ropa de invierno), mientras que el modelo adaptativo de la misma norma para edificios con ventilación natural amplía ambos rangos hasta  $\pm 3,5$  °C. En la Figura 1 se representan las zonas de confort que se derivan de los dos tipos de enfoques en función de la temperatura media mensual exterior.

---

<sup>2</sup> La temperatura operativa es una temperatura compuesta que agrega los efectos de la temperatura del aire y el entorno radiante.

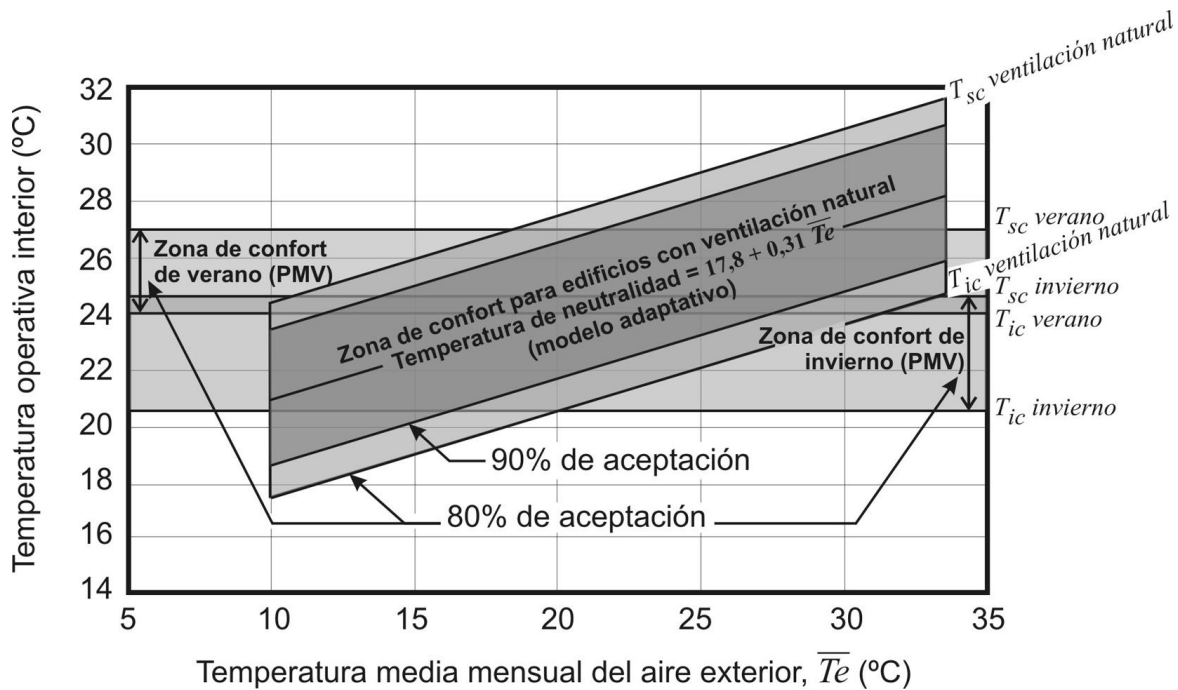


Figura 1. Zonas de confort para edificios con calefacción (invierno), aire acondicionado (verano) y ventilación natural, basadas en ASHRAE 55 (PMV y adaptación). Notación:  $T_{ic}$ : temperatura inferior de confort;  $T_{sc}$ : temperatura superior de confort.

**El edificio. Una caracterización basada en su temperatura interior**

La caracterización del edificio que aquí se propone se basa en la temperatura operativa interior obtenida por simulación o por mediciones *in situ*. Normalmente la simulación de un edificio se realiza en las etapas finales del proceso de diseño y consiste en calcular la temperatura operativa interior a fin de cotejarla con el criterio de confort térmico, expresándose el resultado en series de tiempo de la temperatura, los grados-hora de calor o frío o el porcentaje de tiempo de confort. La simulación concebida así es de comprobación de un diseño, con la posibilidad de volver a él. Si embargo, para que estos resultados puedan ser útiles en etapas tempranas del proceso de diseño, deben, por un lado, desligarse de los atributos del edificio asociados a las decisiones finales, y, por otro, ser objeto de un tratamiento descriptivo que concluya en patrones típicos de comportamiento bajo ciertas premisas. En otras palabras, el resultado debe desacoplarse, siguiendo hipótesis válidas, de las especificidades del caso.

Un concepto que permite hacer esto es el de temperatura de funcionamiento libre (*free-running temperature*) (Ghiaus 2003, 2006; Ghiaus y Allard, 2005; Rosales *et al.*, 2007). La temperatura de funcionamiento libre se define como la temperatura operativa interior de un edificio estando éste cerrado (sin ventilación) y sin sistemas de climatización activa, para la cual, dada una temperatura exterior, el edificio está en equilibrio térmico. Esta condición de equilibrio significa que las ganancias de calor (básicamente solares y cargas internas) equivalen a las pérdidas de calor conductivas, según la relación lineal:

$$K(T_i - T_o) = q_{gan} \tag{1}$$

donde  $K$  es la conductancia térmica global del edificio ( $W/^\circ C$ );  $T_l$  y  $T_o$  son respectivamente la temperatura de funcionamiento libre y la temperatura exterior ( $^\circ C$ ) y  $q_{gan}$  es la ganancia total de calor (sol más cargas internas) ( $W$ ). De la relación anterior se desprende que:

$$T_l = T_o + \frac{q_{gan}}{K} \quad (2)$$

La ecuación (2) indica que, en condiciones de equilibrio, la temperatura de funcionamiento libre equivale a la temperatura exterior más un incremento proporcional a las ganancias de calor según el valor de  $K$ .

El problema de suponer el equilibrio bajo condiciones transitorias es que se desestima la influencia de los procesos de acumulación de calor, que son los que hacen que el problema sea en realidad dinámico. Esta suposición puede aceptarse en estimaciones del gasto energético de edificios que se mantengan a una temperatura constante (*i.e.*, cuyo interior esté en equilibrio térmico) y que integren los aumentos y descensos periódicos de la temperatura exterior, pero no puede aceptarse de fluctuar la temperatura interior (ASHRAE, 2009, 19.17).

Conceptualmente, el edificio puede concebirse como un filtro que amortigua y desfasa la onda diaria de la temperatura exterior. Si no hay ganancias solares ni internas, las medias de las temperaturas exterior e interior son iguales, pero no sus valores máximos y mínimos, ni la hora en que éstos ocurren. De presentarse ganancias, éstas incrementan la media (de ahí la importancia de la ventilación como estrategia de enfriamiento). Durante este proceso de carga y descarga, la temperatura interior, a una hora dada, es una consecuencia del historial térmico, no de la temperatura exterior a esa hora. De ahí que la imprecisión de la suposición de equilibrio crezca en la medida en que crezcan la amplitud diaria de la temperatura y la inercia térmica de la envolvente.

Este inconveniente se puede sortear de varias formas, siendo una la linearización del comportamiento del edificio mediante técnicas de regresión aplicadas a los resultados de la simulación o la experimentación. De adecuarse la relación entre la temperatura exterior y la temperatura interior a un modelo de regresión, se haría posible desligar el comportamiento del edificio del clima, pues se contaría con una ecuación para esa relación. En tal sentido, es lógico suponer que la dispersión de la nube de puntos que resultaría de graficar esa relación utilizando los resultados de la simulación aumentaría si se considerasen realísticamente aspectos con una fuerte componente aleatoria, tales como la radiación solar horaria (debido a las variaciones de la nubosidad), la ventilación cruzada o las variables de ocupación. Con miras a reducir esta dispersión, se puede, además de anular la ventilación, suponer cargas internas constantes. Si además se acota el análisis a períodos sin cambios significativos en los ángulos solares y la amplitud diaria de la temperatura exterior (un mes, una estación o una temporada, según las particularidades del clima), a una hora específica del día, la regularidad entre días haría que las ganancias de calor (sol más cargas internas) y la conductancia térmica global (dinámica) del edificio sean siempre similares, y por lo tanto también su relación. De ahí que se pueda prever un comportamiento lineal

vinculable a la ecuación (2) para esa relación si se asumen tales hipótesis.

La Figura 2 muestra los diagramas de dispersión que se obtienen para cuatro horas del día durante el mes de junio en una vivienda situada en Caracas, de una planta, conformada por paredes de bloques y friso, techo de fibrocemento y tejas con cámara de aire y ventanas de vidrio simple. De admitirse, con base en el *cuasi*-paralelismo entre la temperatura interior y la temperatura exterior que a una hora del día y durante un mes la diferencia entre ambas temperaturas es constante e igual al promedio de las diferencias diarias, la relación entre las ganancias de calor y la conductancia global (que es lo que expresaría esa diferencia según la ecuación (2)) se desliga de la temperatura exterior, pasando a ser sólo función de la hora. Esa diferencia debe además ser la misma en cualquier lugar con ángulos solares similares (i.e., en cualquier lugar de latitud similar).

El promedio de las diferencias entre la temperatura interior y la temperatura exterior puede asumirse como una especificidad del edificio. Ghiaus (2003) llama a esa diferencia *huella energética del edificio*. La Figura 3 muestra gráficamente la huella energética de esta vivienda con base en los promedios semanales y para las 24 horas del día. Obsérvese que la vivienda aumenta su diferencia de temperatura en la noche, cuando afuera la temperatura baja, para luego reducirla cuando afuera sube, aumentarla de nuevo por causa de la acumulación del calor del sol y finalmente acercarla otra vez a la temperatura exterior al caer la tarde.

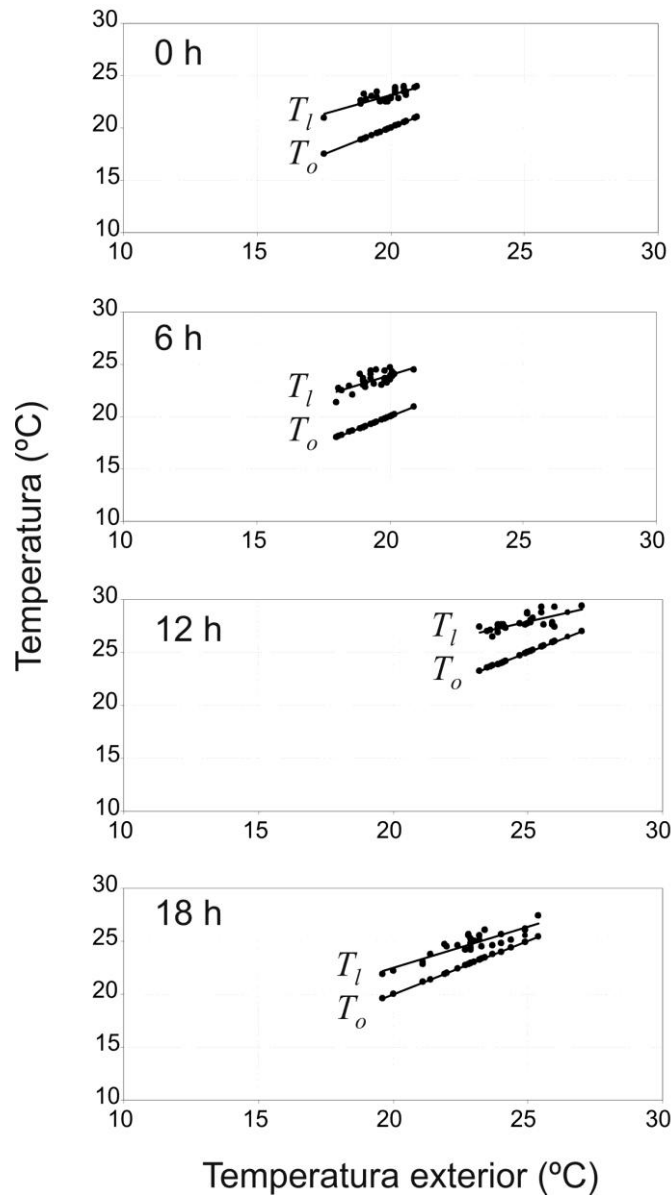


Figura 2. Temperatura exterior ( $T_o$ ) y temperatura interior ( $T_l$ ) durante el mes de junio en cuatro horas del día en una vivienda de una sola planta ubicada en Caracas (paredes de bloques y friso, techo de fibrocemento y tejas con cámara de aire, ventanas de vidrio simple)

Una peculiaridad observable en la Figura 3 es la similitud de la magnitud y evolución diarias de la diferencia entre la temperatura de funcionamiento libre y la temperatura exterior a lo largo del año, lo que se explica por el carácter isotermo del clima tropical (se puede en efecto verificar que en climas con diferencias estacionales importantes esa regularidad no se da). Ello lleva a suponer condiciones para adecuar un modelo de regresión lineal al diagrama de dispersión de todo el año para una hora del día, lo que no implica olvidar que al hacerlo se desdiferenciarían, al menos de forma explícita, las distintas temporadas, algo aceptable en la medida en que la precisión planteada permita ignorar la amplitud térmica anual (la cual en Venezuela es menor de 5 °C).

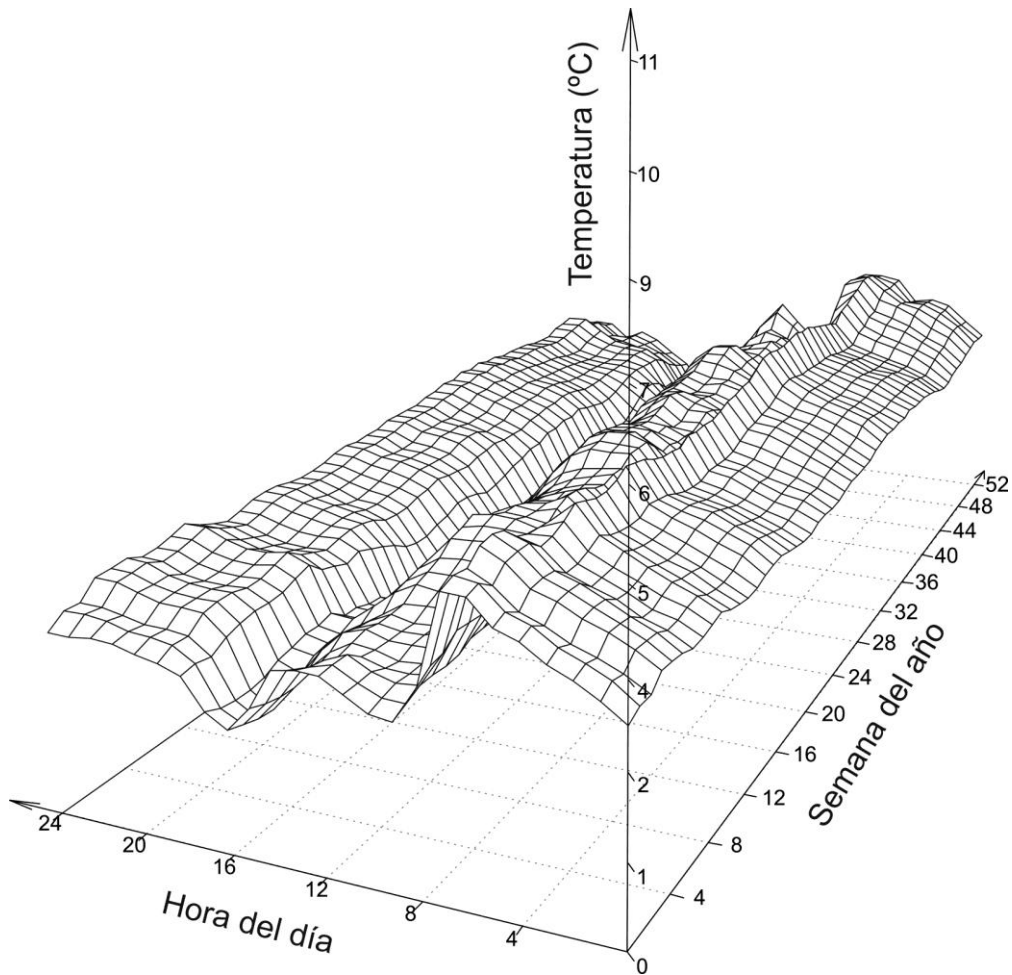


Figura 3. Diferencia entre la temperatura libre y la temperatura exterior en una vivienda de una sola planta ubicada en el trópico (huella energética – precisión semanal)

La Figura 4 muestra los diagramas de dispersión y los modelos de regresión lineal con sus respectivas estadísticas básicas para la misma vivienda en Caracas y las mismas cuatro horas del día consideradas en las gráficas de la Figura 2, pero ahora reuniendo los valores de todo el año. Obsérvese que el modelo de regresión lineal a una hora específica es casi paralelo a la temperatura exterior en horas nocturnas, pero pierde paralelismo en horas diurnas. Esto es atribuible a que, a una misma hora, a lo largo del año, la ganancia de calor solar varía según la época, al cambiar los ángulos solares. Una consecuencia es que se hace notar el efecto de la inercia térmica del edificio simulado: para temperaturas exteriores muy altas, a esas horas, la temperatura de funcionamiento libre tenderá a ser inferior a la exterior. Cuanto mayor sea la inercia térmica, más fácilmente se manifestará esa tendencia. Un edificio con una inercia térmica muy alta presentará de hecho temperaturas inferiores a la temperatura exterior todas las tardes, al margen del clima. Desde una perspectiva estrictamente matemática, si se mantiene la suposición de equilibrio térmico, la conductancia global del edificio

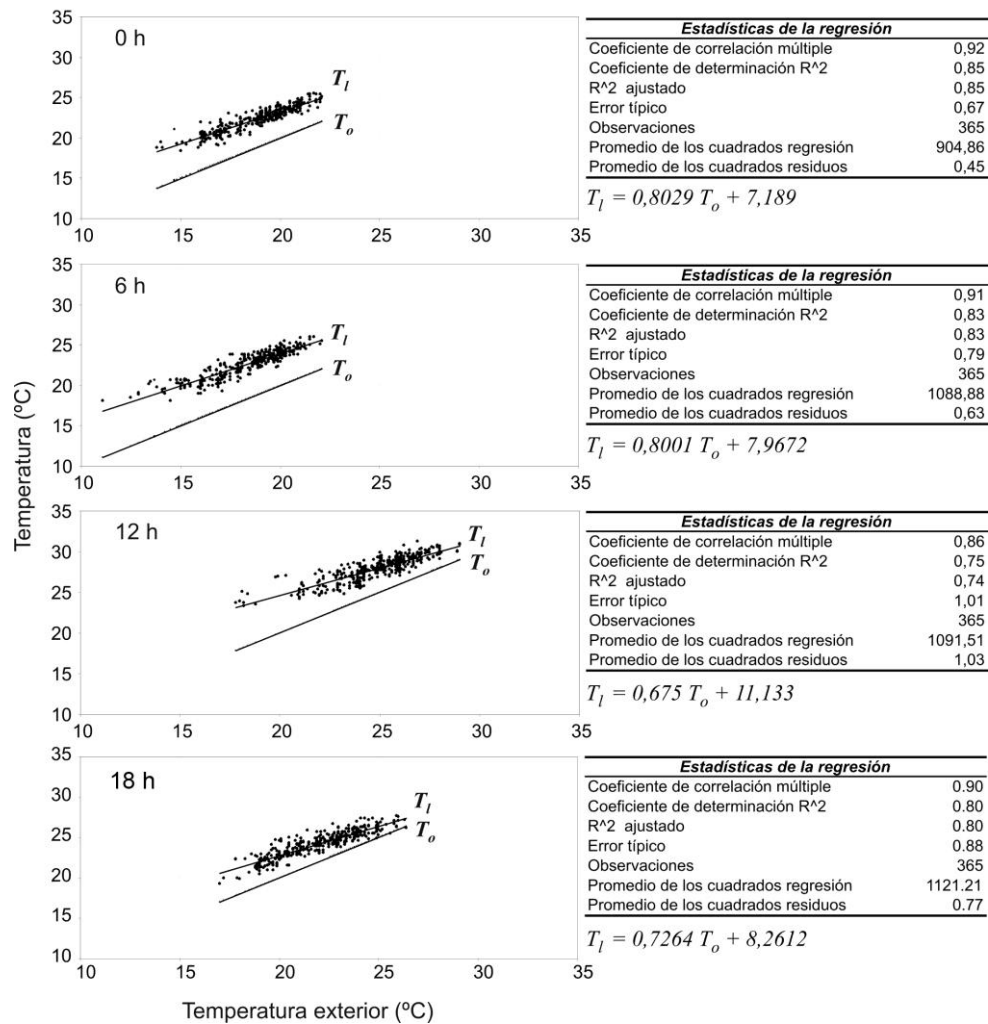


Figura 4. Temperatura exterior ( $T_o$ ) y temperatura de funcionamiento libre ( $T_l$ ) durante un año a 4 horas del día en una vivienda simple en Caracas y estadísticas del modelo de regresión lineal.

pasa a ser negativa (en otras palabras, el *incremento* asociado a las ganancias de calor se hace negativo, pues se parte de la suposición de que sin ganancias ambas temperaturas son iguales). De ahí que a pesar de que el clima sea aproximadamente isoterma, el no paralelismo impide asumir, para todo un año, la regularidad aceptada en períodos de un mes, sobre cuya base Ghiaus (2003) definió la huella energética del edificio.

La diferencia entre la temperatura de funcionamiento libre y la temperatura exterior deja por tanto de depender sólo de la hora y se convierte también en una función de la temperatura exterior. Esto es, la relación entre las ganancias de calor y la conductancia global del edificio, a una hora dada, pasa a ser también función de la temperatura exterior. Que  $T_l$  no sea del todo paralela a  $T_o$  no anula el que su relación pueda modelarse por medio de una regresión lineal simple, según la expresión:

$$T_{li} = \beta_1 + \beta_2 T_{ot} + u_t \quad (3)$$

donde  $t$  es el número de la observación,  $\beta_1$  es el valor del modelo para una temperatura exterior igual a cero,  $\beta_2$  es la pendiente del modelo y  $u_t$  es la dispersión para la observación  $t$ , atribuible a la influencia de los factores distintos a la temperatura exterior al momento de la observación (considerados de menor peso), tales como las variaciones aleatorias de la radiación solar horaria y el desigual efecto de la inercia térmica como consecuencia de las diferencias diarias en las condiciones térmicas previas a la observación.

La Figura 5 muestra los modelos obtenidos para las 18 h (6 pm) al simular por un año la vivienda, ubicándola en cuatro ciudades distintas. Adviértase la similitud de los cuatro modelos, lo que permite, aproximando, generar un modelo basado en los valores promedio, el cual caracterizaría el comportamiento de la vivienda a esa hora en cualquier clima de latitud similar. Al basarse en promedios, la dispersión se reduce y el modelo se robustece. Adviértase también que la temperatura de funcionamiento libre se hará inferior a la temperatura exterior para valores de ésta superiores a 34 °C (algo de muy poca ocurrencia a esa hora en Venezuela).

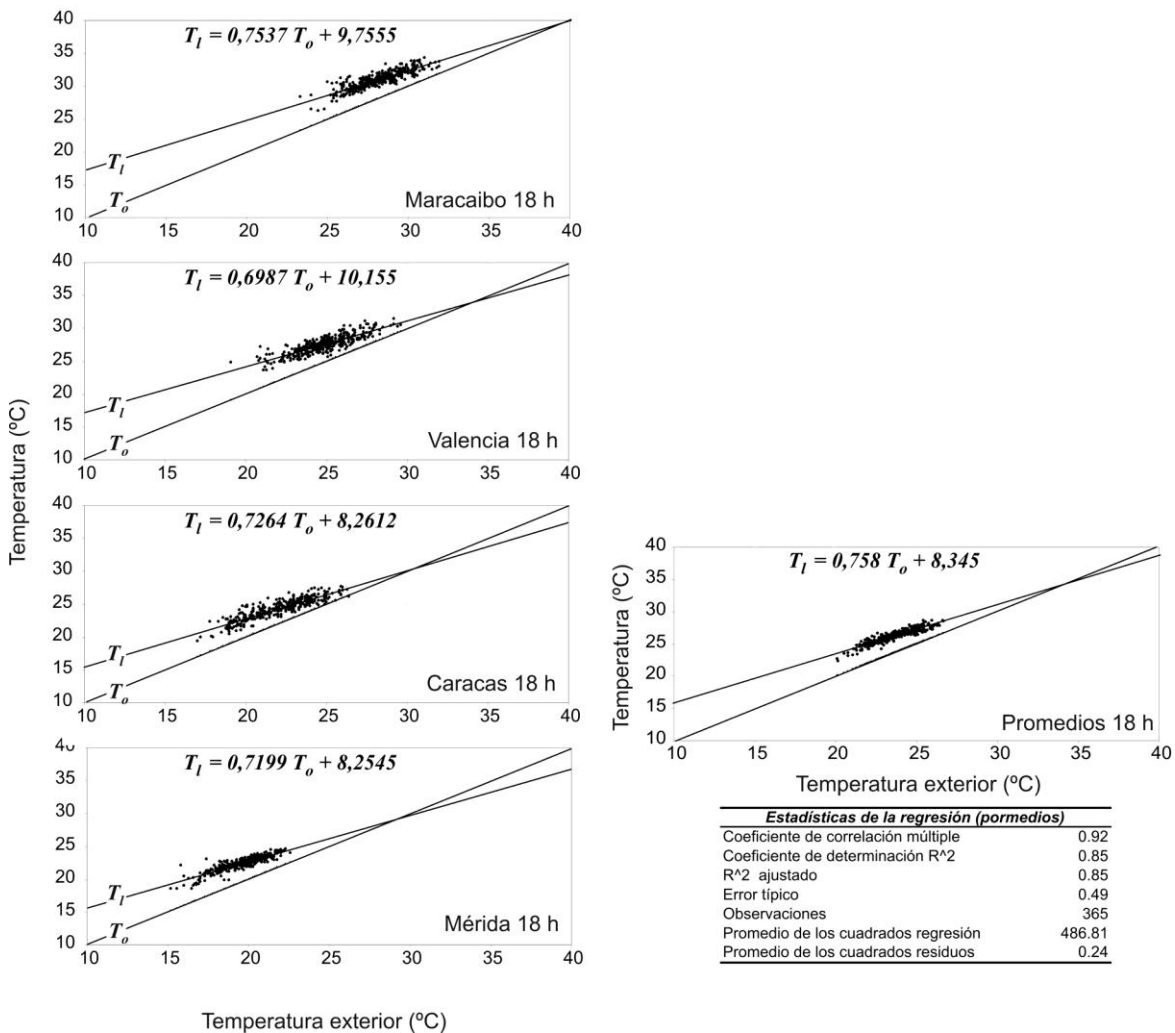


Figura 5. Modelos de regresión lineal simple de la temperatura de funcionamiento libre en función de la temperatura exterior a las 18 h para una vivienda ubicada en cuatro ciudades; a la derecha, regresión lineal que se obtiene con los valores promedios de las cuatro ciudades

### ***El clima. Una caracterización estadística***

Desde una perspectiva térmica, los elementos del clima que más influyen en la temperatura de un edificio son la temperatura del aire, la radiación solar y, de funcionar el edificio con ventilación natural, el viento. La caracterización del viento en términos de velocidad y dirección no es propiamente térmica, pero los caudales que se producen tienen un efecto térmico, al sustituir el aire interior por uno de temperatura diferente (igual a la temperatura exterior cuando se trate de ventilación directa). El viento también incide como un modificador de los intercambios convectivos en las superficies interiores y exteriores.

La radiación solar tiene una importancia primaria como fuente de calor en los edificios, aunque, para que se den diferencias sustanciales en sus valores globales, se requiere recorrer grandes distancias. La radiación solar se correlaciona de forma estrecha con la temperatura del aire, al punto que, de no conocersele, se le puede estimar sobre la base de dicha correlación (Morid *et al.*, 2002; Mandal *et al.*, 2003). Esa relación es la que permite suponer de hecho una buena correlación entre la temperatura exterior y la temperatura de funcionamiento libre, puesto que las fluctuaciones de esta temperatura se deben básicamente a la acción conjunta de las fluctuaciones de la temperatura exterior y la radiación solar, siendo a su vez que las fluctuaciones de la temperatura exterior se deben básicamente a las fluctuaciones de la radiación solar.

Por lo anterior, y considerando que la temperatura del aire es el elemento más usado para describir un clima, a éste se le caracterizará mediante la distribución de frecuencia de la temperatura del aire. Las distribuciones de frecuencia ofrecen una información más rica que las series de tiempo, al permitir comparar de un vistazo la ocurrencia de rangos de valores. En la Figura 6 se muestran las distribuciones de frecuencia de la temperatura del aire en cinco localidades venezolanas (Apartaderos, Mérida, Caracas, Valencia y Maracaibo). Este tipo de información puede, como se verá luego, cotejarse fácilmente con el criterio de confort y así observarse qué tan centrada queda la distribución de cada localidad respecto de la intersección entre la temperatura exterior y el rango de confort.

### ***APLICACIÓN DEL MÉTODO. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE ADAPTACIÓN AL CLIMA DE UN EDIFICIO Y SUS VARIANTES***

#### ***Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar térmico en un edificio caracterizado por su temperatura de funcionamiento libre***

En la Figura 7 se muestra un ejemplo de la representación gráfica de los grados-hora de malestar térmico en función de la temperatura exterior que se obtiene al combinar la temperatura de funcionamiento libre de un edificio (entendida como una caracterización sintética del mismo), el criterio de confort térmico adaptativo y la distribución de frecuencia de la temperatura exterior de un clima específico, a una hora del día, durante un período de tiempo dado. El clima es concretamente el de Caracas, a las 15 h (3 pm), a lo largo de un año (*i.e.*, dicha distribución se basa en 365 valores de temperatura). El edificio es una vivienda simple cuya envolvente es de elevada conductividad.

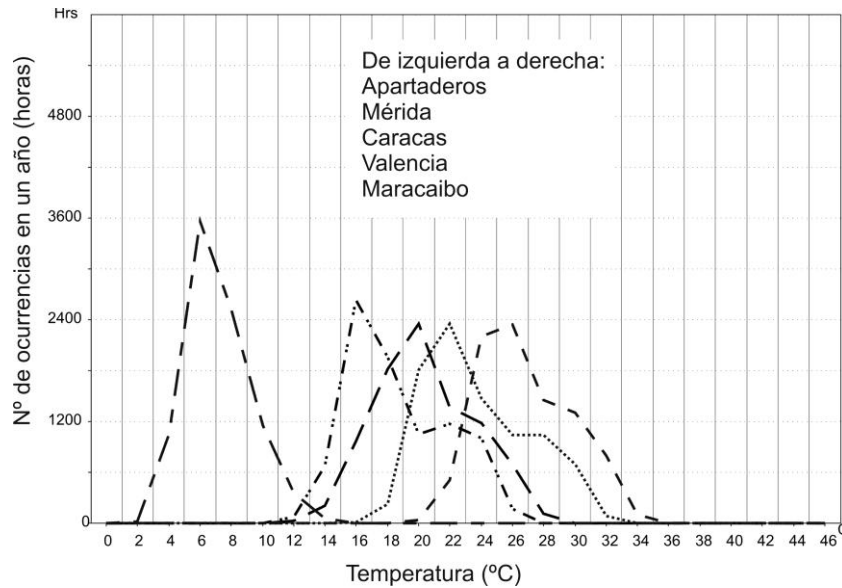


Figura 6. Distribución de frecuencia de la temperatura del aire en cinco ciudades venezolanas

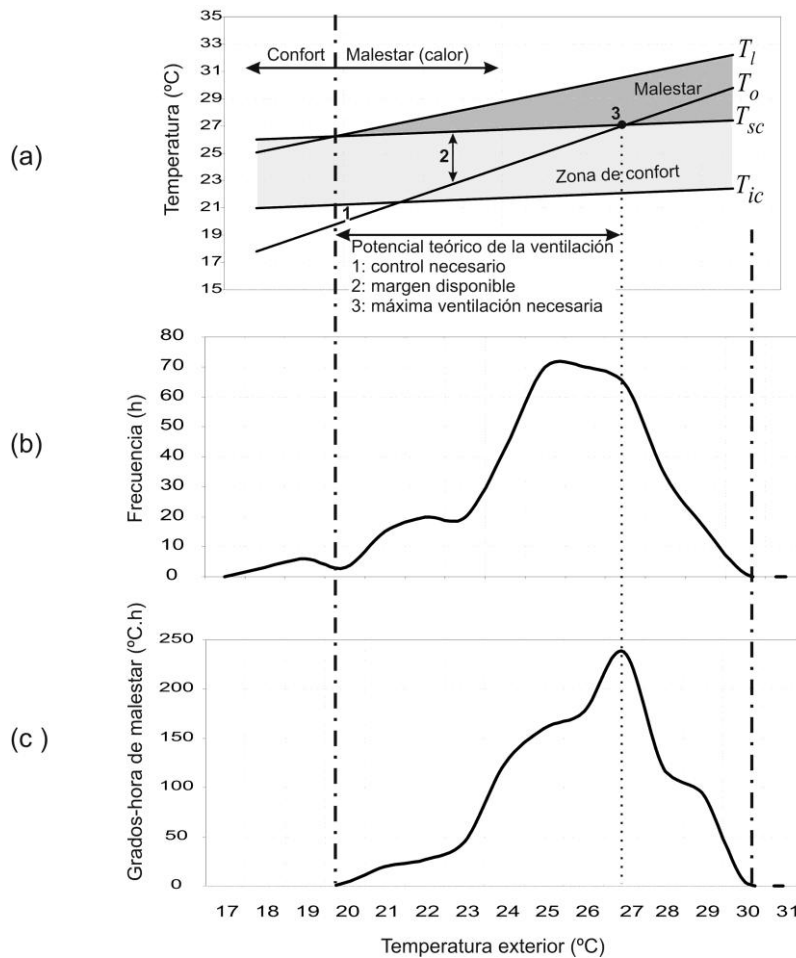


Figura 7. Grados-hora de malestar por exceso de calor en una vivienda a las 15 h en Caracas (a) Temperatura interior ( $T_i$ ), temperatura exterior ( $T_o$ ) y rango de confort ( $T_{ic} \leftrightarrow T_{sc}$ ); (b) distribución de frecuencia de la temperatura exterior (c) grados-hora de malestar

Obsérvese que para temperaturas exteriores menores de 20 °C, la temperatura de la vivienda se ubica en la zona de confort, pero tal situación es poco frecuente a esa hora en Caracas. En cambio, la mayor ocurrencia corresponde a temperaturas de 25, 26 y 27 °C. Cerca de 200 días al año la temperatura exterior en Caracas está en esos niveles a esa hora. Para esas tres temperaturas exteriores la temperatura interior toma valores de 2 a 4 °C más altos que la temperatura máxima admisible según el criterio de confort, lo que contribuye en cerca de 600 °C.h de exceso de calor de un total anual de aprox. 1000 °C.h. Para que la vivienda se encuentre en confort a esa hora durante todo el año la única opción es que la temperatura exterior se mantenga por debajo de los 20 °C, no demasiado lejos de ese valor (de estar muy lejos se pondría por debajo de la zona de confort, más a la izquierda de lo representado en la Figura 7). En otras palabras, la vivienda no se adapta a las condiciones de Caracas a las 15 h, pero pudiera hacerlo en otra ciudad más fría. Al graficarse la temperatura exterior junto con la temperatura de funcionamiento libre (Figura 7(a)), se advierte que de ventilarse (*i.e.*, de acercarse la temperatura interior a la del aire exterior), se podría restituir el confort una parte del tiempo en que no lo hay sin ventilar. La ventilación puede entenderse luego como una estrategia de diseño cuya incorporación cambia el edificio y cuyo efecto puede medirse.

### ***Potencial de estrategias de diseño respecto de un edificio de base***

Adicionar una estrategia de diseño a un edificio de base concebido como un esquema inicial elemental significaría plantear la posibilidad de restituir el confort en al menos parte de su distribución de grados-hora de malestar térmico. A una hora del día, dicha estrategia producirá un aumento o una disminución de la temperatura de funcionamiento libre. Ello conllevaría una temperatura operativa de funcionamiento libre distinta o, visto de otro modo, un edificio distinto. La nueva temperatura, al igual que la anterior, es la variable dependiente de una regresión lineal cuya variable independiente es la temperatura exterior. El desplazamiento de la temperatura interior del edificio puede ser negativo o positivo. De ser positivo, la estrategia de diseño calentaría a esa hora el edificio ( $T_{est} > T_l$ ), y de ser negativo, lo enfriaría ( $T_{est} < T_l$ ). Las Figuras 8 y 9 muestran los rangos y situaciones que se presentan al modificar la temperatura operativa de funcionamiento libre ( $T_l$ ) por la temperatura que resultaría de aplicar la estrategia ( $T_{est}$ ) para los casos en que  $T_{est} < T_l$  (enfriamiento) y  $T_{est} > T_l$  (calentamiento).

### ***Ejemplo de aplicación***

A fin de ilustrar la información que se puede derivar del método, se simuló una vivienda simple. Los materiales iniciales se escogieron con criterios mínimos y alejados de toda consideración climática (cerramientos livianos y conductores). Las ventanas son de vidrio simple y están cerradas (como corresponde al edificio en funcionamiento libre). Se consideraron cargas internas constantes típicas de una vivienda. Luego se simuló esa vivienda aplicándole uno a uno cambios que se derivan de estrategias básicas de diseño: la vivienda apartada del sol, muy bien ventilada, con acabados muy reflectantes, de cerramientos muy pesados y envuelta en material aislante. La simulación abarca un año y se realizó en cuatro ciudades venezolanas de clima distinto: Maracaibo, Valencia, Caracas y Mérida.

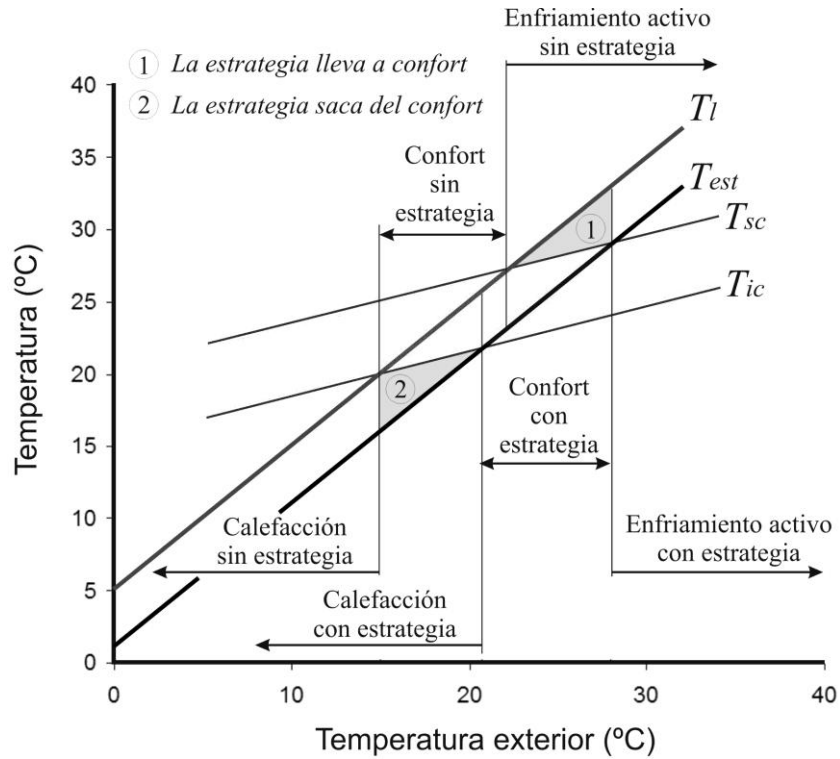


Figura 8. Rangos a una hora específica de la temperatura operativa libre ( $T_l$ ) y la temperatura operativa luego de aplicar la estrategia de diseño ( $T_{est}$ ). Caso  $T_{est} < T_l$  (enfriamiento)

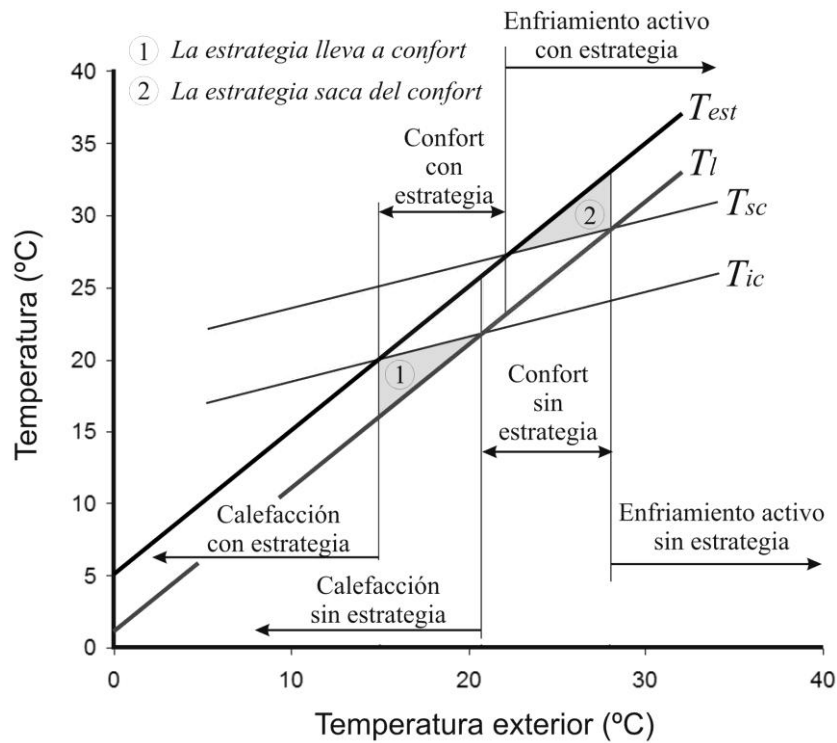


Figura 9. Rangos a una hora específica de la temperatura operativa libre ( $T_l$ ) y la temperatura operativa luego de aplicar la estrategia de diseño ( $T_{est}$ ). Caso  $T_{est} > T_l$  (calentamiento)

Para una hora del día y una ciudad, el resultado se divide en tres gráficas referidas a la temperatura exterior: a) una primera gráfica con los diagramas de dispersión y las regresiones lineales de la temperatura interior, la temperatura exterior y el criterio adaptativo de confort limitado por valores máximos y mínimos que dependen del clima de la ciudad (rango de  $\pm 2,5$  °C = aceptabilidad de 90%); b) una segunda gráfica con la distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad y c) una tercera gráfica con la distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que producen las temperaturas operativas de la primera gráfica en el clima caracterizado en la segunda gráfica. La Figura 10 muestra un ejemplo de los resultados para las 18 h (6 pm) en Maracaibo y Valencia.

La similitud de las regresiones de las cuatro ciudades hace que se pueda considerar que cualquiera de ellas representa el comportamiento de la vivienda en cualquier clima de país (o sitio de latitud similar). Puesto que ya se cuenta con las regresiones de las cuatro ciudades, se puede, buscando representatividad, calcular un promedio. Ejemplos de esos promedios se muestran en las Figuras 11 y 12. Allí se eliminó la nube de puntos a fin de limpiar el dibujo. La zona de confort sombreada es una zona de confort promedio. Sin embargo, se indican, en líneas discontinuas, las zonas de confort de Maracaibo y Mérida, que son las que marcan los límites en ese rango de altitud. Si se acepta obviar la dispersión, las intersecciones entre las líneas de la temperatura interior y la zona de confort indican los rangos de la temperatura exterior para los cuales la vivienda está en confort térmico o en malestar térmico (frío a la izquierda y calor a la derecha).

Estas regresiones promedio son una caracterización de la vivienda del ejemplo, la cual se puede considerar a su vez como una representación de muchas viviendas sencillas como esa. En la medida en que sea así, estas gráficas (o las que se puedan generar mediante criterios distintos de definición de las técnicas o estrategias a evaluar) pueden usarse directamente en las etapas iniciales del proceso de diseño (*i.e.*, sin necesidad de simular), sea de forma cualitativa, juzgando sólo con base en las temperaturas típicas del clima, sea de manera cuantitativa, calculando, con base en la distribución de frecuencia de la temperatura exterior, los grados hora de malestar de la vivienda en ese clima.

## **CONCLUSIONES**

Evaluar la adaptabilidad de un edificio a un clima desde la perspectiva del confort térmico demanda caracterizar y relacionar tres elementos: el comportamiento térmico del edificio, el clima y el criterio de confort térmico. En las etapas tempranas del proceso de diseño, cuando se está frente a un problema abierto, el interés consiste en tomar decisiones correctas sobre la base de datos escasos y de carácter general. Habitualmente esto se hace aplicando métodos *iniciales* que relacionan el clima y el criterio de confort y sugieren con base en ello estrategias genéricas globales, o aplicando métodos *intermedios* que dan indicaciones globales acerca de aspectos más puntuales como la forma de la planta del edificio, la orientación, la volumetría, la distribución espacial, la resistencia térmica de la envolvente, su inercia térmica, el control de la radiación solar, etc.

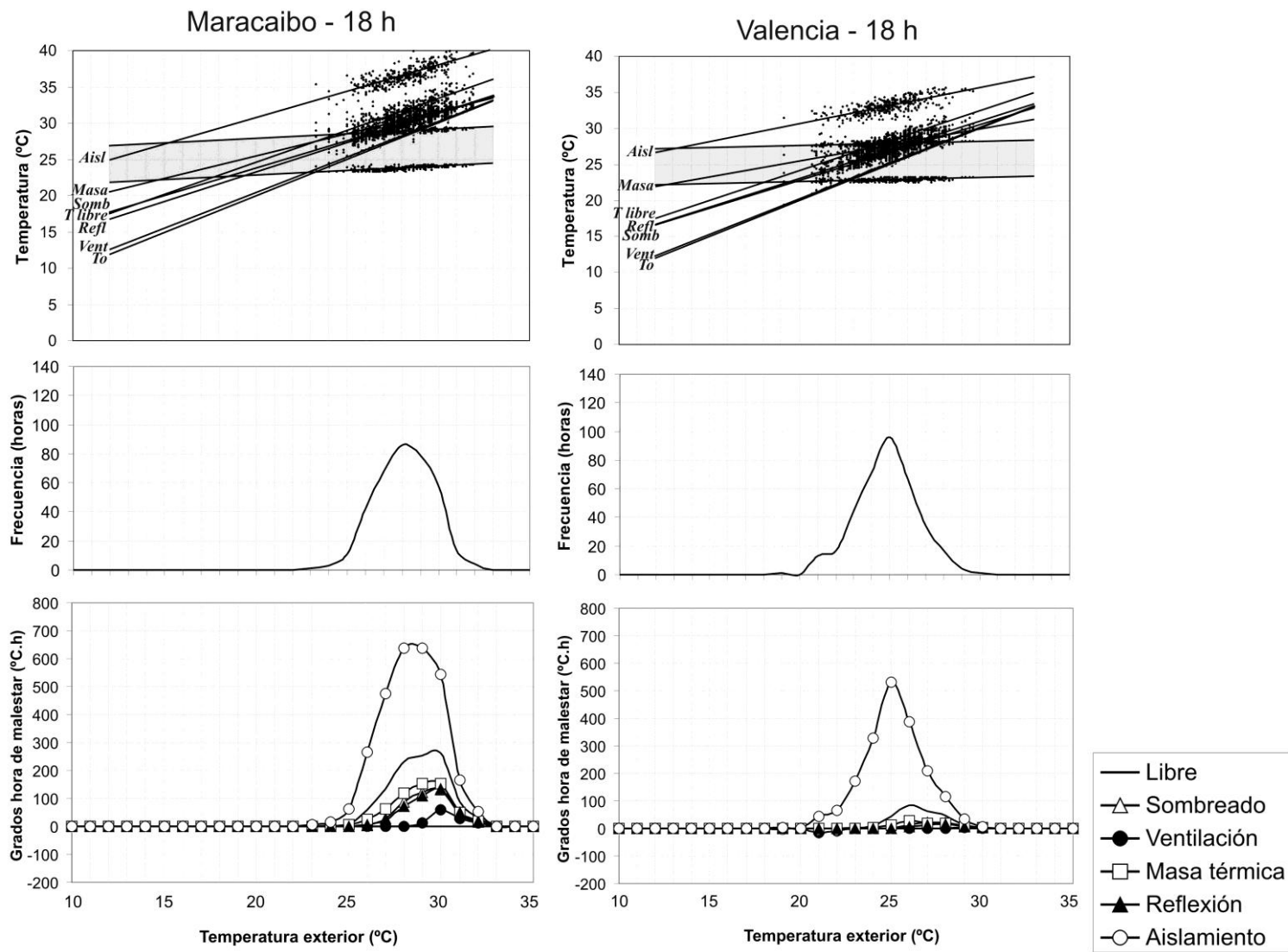


Figura 10. De arriba a abajo: a) diagramas de dispersión y regresiones de la temperatura interior, la temperatura exterior y el criterio de confort; b) Distribución de frecuencia de la temperatura exterior de la ciudad indicada, a la hora indicada; c) Distribución de frecuencia de los grados-hora de malestar que resultan de combinar las dos gráficas anteriores

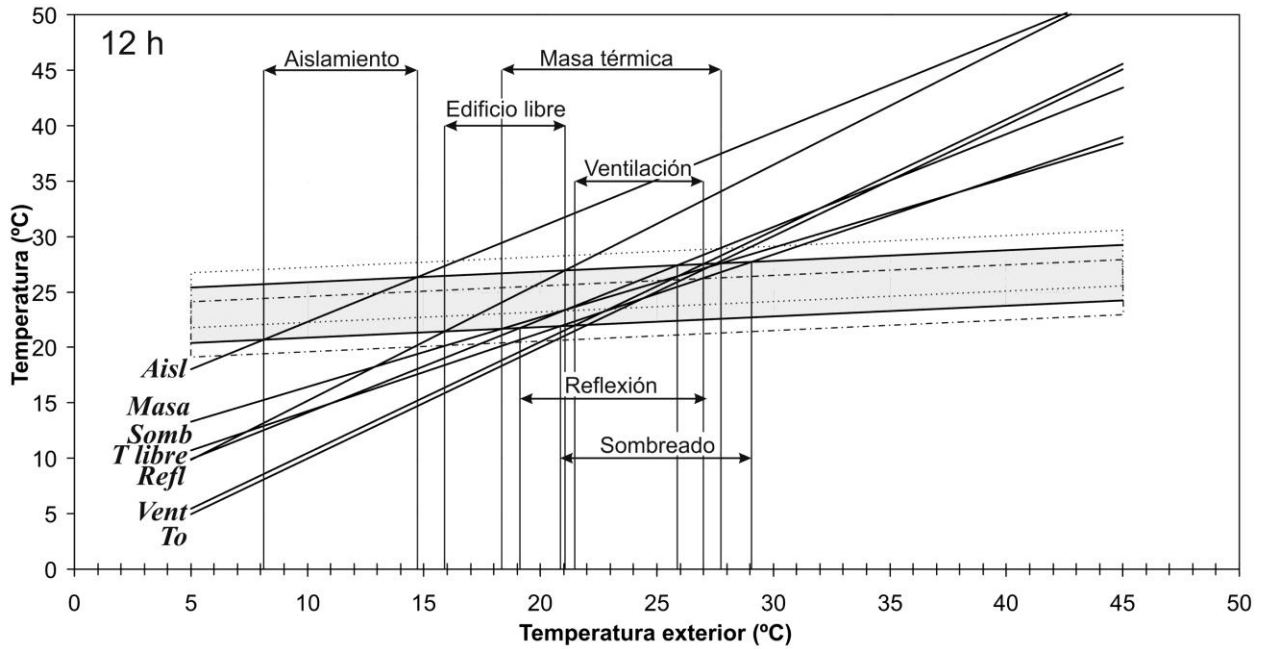


Figura 11. Rangos de la temperatura exterior para los cuales la vivienda presenta condiciones de confort térmico a las 12 h. Nota: la zona de confort sombreada es una zona de confort promedio. Las zonas de confort señaladas con líneas discontinuas son las de Maracaibo y Mérida

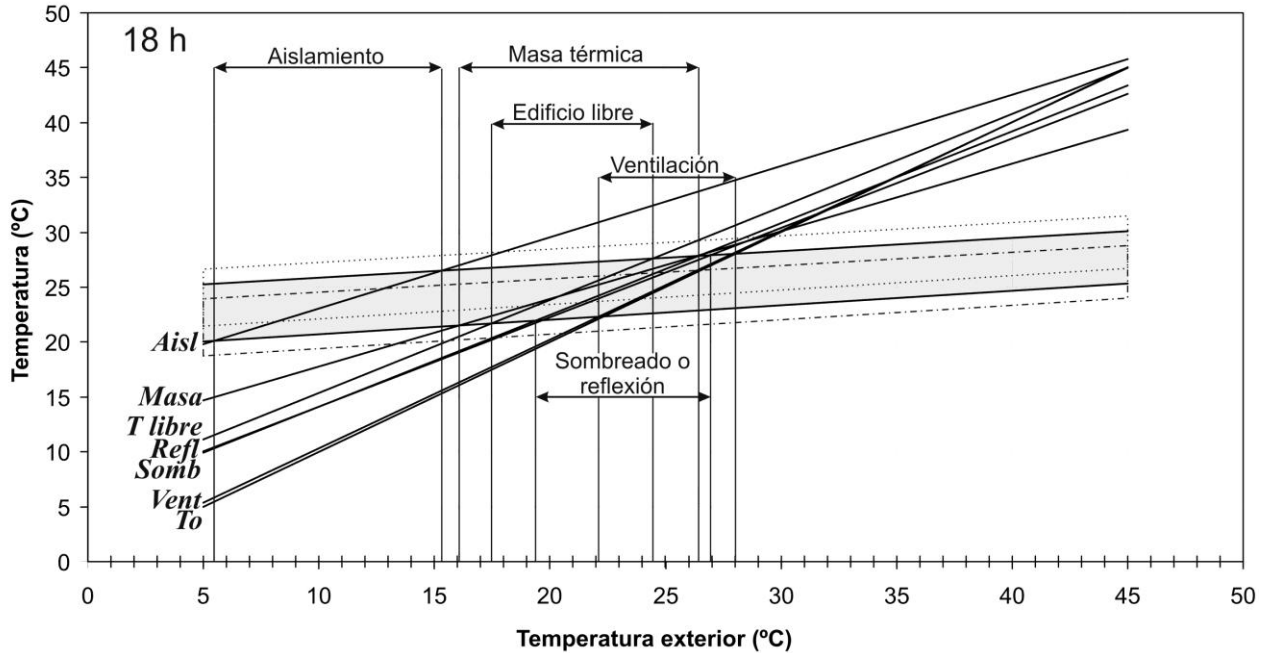


Figura 12. Rangos de la temperatura exterior para los cuales la vivienda presenta condiciones de confort térmico a las 18 h. Nota: la zona de confort sombreada es una zona de confort promedio. Las zonas de confort señaladas con líneas discontinuas son las de Maracaibo y Mérida

Un enfoque más específico es el presentado en este texto, basado en el uso de la temperatura de funcionamiento libre, definida como la temperatura operativa interior de un edificio sin ventilación y sin sistemas de climatización activa para la cual, dada una temperatura exterior, el edificio se encuentra en equilibrio térmico. Si se elimina la aleatoriedad relacionada con la ventilación natural y se considera que las ganancias de calor son estables, la diferencia entre la temperatura interior y la temperatura exterior se puede considerar a una hora del día independiente del clima, convirtiéndose en una caracterización sintética del edificio. En otras palabras, se desacoplan el comportamiento del edificio y el clima en el que se encuentra, al derivarse un patrón de comportamiento común a todos los climas. De hacerse lo mismo para las variantes que se obtienen de aplicar en el edificio cambios potencialmente deseables desde la perspectiva del confort, se obtiene una caracterización desligada del clima tanto del edificio como sus variantes. Si finalmente se caracteriza al criterio de confort por medio de las regresiones lineales dependientes de la temperatura exterior de los modelos adaptativos y al clima por medio de la distribución de frecuencia de la temperatura exterior, se pueden obtener estimaciones rápidas del potencial de adaptación del edificio a ese clima, lo que representa una información valiosa para la toma de decisiones en las etapas iniciales del proceso de diseño, en la medida en que el edificio del cual se obtiene tal información pueda considerarse representativo del edificio que se va a diseñar.

El enfoque es ciertamente más específico que el de los métodos habitualmente usados en las etapas tempranas del proceso de diseño, en razón de que para simular un edificio (o realizar mediciones experimentales en él) a objeto de determinar su temperatura interior se requiere contar con el edificio, al margen de que a éste se le conciba, en el caso de la simulación, como un esquema elemental de partida. A diferencia, por ejemplo, de los diagramas bioclimáticos, en los que se suponen de forma genérica *todos* los edificios, la proyección del método como fuente de información utilizable en cualquier proyecto requiere concebir al edificio cuyo patrón de comportamiento se representa por medio de regresiones lineales como un *tipo* de edificio, no como *todos* los edificios. En el otro extremo, pensar en usar el método para evaluar cambios muy concretos en cualquier etapa del proceso de diseño (es decir, sin trascender el contexto del proyecto en que se esté), lo aproximaría a los métodos tradicionales de comprobación computarizada de casos concretos, siendo que la única diferencia sería la forma no tradicional en que se presentan los resultados (lo que puede de por sí considerarse un aporte puntual, pero no el principal).

A un nivel más riguroso, en el proceso de conferirle al método un carácter genérico de cierto alcance, se debe observar que a los errores asociados, por un lado, a las diferencias que surgirían de simular el mismo edificio en distintos climas y, por otro, a la exclusión del término aleatorio del modelo de regresión lineal, se añadiría el error implícito en las *diferencias* reales entre el edificio considerado como modelo y el edificio concreto del proyecto en el que se esté.

Sin embargo, en todo esto no se puede olvidar que la característica principal de los métodos iniciales es justamente que se basan en datos generales y

escasos, por lo que no pueden ser precisos: la premisa de usárseles lo antes posible conlleva ese costo. En la medida en que eso sea así, no se puede pretender obtener con ellos demasiadas respuestas acerca de la concreción detallada de las orientaciones que dan, aunque, de nuevo, en el caso del presente método, puesto que simular significa concebir un edificio concreto, la sola realización de la simulación reafirma su carácter específico.

## REFERENCIAS

- Altavilla F., Vicari B., Hensen JLM., y Filippi M. (2004) *Simulation Tools for Building Energy Design*. In: Proc. Ph.D. symposium Modelling and Simulation for Environmental Engineering, Czech Technical University Prague, 16 April.
- ASHRAE (2009) *Ashrae Handbook – Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ISBN-10: 1933742542.
- Breesch H. y Janssens A. (2007) *Reliable Design of Natural Night Ventilation Using Building Simulation*. 10th Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings Conference : 30 years of research. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Disponible en web: <[http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/Session%20PDFs/186\\_New.pdf](http://www.ornl.gov/sci/buildings/2010/Session%20PDFs/186_New.pdf)>.
- Comisión para el Mejoramiento de la Calidad Térmica de las Edificaciones y el Espacio Urbano (1999) *Recomendaciones para mejorar la calidad térmica de las edificaciones*. Maracaibo Grafipress, C. A., VENEZUELA 161 p. ISBN: 980-296-733-5.
- Crawley D., Hand J., Kummert M., Griffith B. (July 2005) *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. Version 1.0, United States Department of Energy, University of Strathclyde and University of Wisconsin. Informe completo disponible en Web: <[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/pdfs/contrasting\\_the\\_capabilities\\_of\\_building\\_energy\\_performance\\_simulation\\_programs\\_v1.0.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/pdfs/contrasting_the_capabilities_of_building_energy_performance_simulation_programs_v1.0.pdf)>.
- Crawley, D.B. and Hand, J., Kummert, M. y Griffith, B.T. (2008) *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. Building and Environment, 43 (4). pp. 661-673. ISSN 0360-1323. Disponible en Web: <<http://strathprints.strath.ac.uk/6555/>>.
- FPNU Fondo de Población de las Naciones Unidas (2007) *Peering into the Dawn of an Urban Millennium*. Web: <<http://www.unfpa.org/swp/2007/english/introduction.html>>.
- Ghiaus C. (2006) *Equivalence between the load curve and the free-running temperature in energy estimating methods*. Energy and Buildings 38: 429-435.
- Ghiaus C. y Allard F. (editores) (2005) *Natural ventilation in the urban environment*. Londres, James and James. ISBN: 1844071294.
- Ghiaus, C. (2003) *Free-running building temperature and HVAC climatic suitability*. Energy and Buildings 35(4): 405-411.
- Givoni, B. (1969) *Man, Climate and Architecture*. Elsevier Science Ltd. ISBN: 0444200398.
- Hobbs D., Morbitzer C., Spires B., Strachan P. y Webster J. (2004) *Experience of Using Building Simulation Within the Design Process of an Architectural Practice*. J. International Building Simulation Performance Association, V14(1), pp43-50, April.
- Holmberg D.G., Bushby S.T., Butler J.F. (2008) *BACnet for Utilities And Metering*. ASHRAE Journal: Apr. 2008, Vol. 50 Issue 4, p22.
- Khemlani L. (2009) *Sustainable Design Tools Exhibited at AIA 2009*. AECBytes newsletter. Disponible en web: <[http://www.aecbytes.com/feature/2009/AIA2009\\_EnergyApps.html](http://www.aecbytes.com/feature/2009/AIA2009_EnergyApps.html)>.

- Malin N. (2007) *Building information modeling and green design*. Revista digital: BuildingGreen.com. Web: <<http://www.buildinggreen.com/auth/article.cfm/2007/5/1/Building-Information-Modeling-and-Green-Design/>>.
- Mandal U., Victor K., Rao N. y Srivastavaand K. (2003) *Estimation of solar radiation from temperature and rainfall*. Vittal Journal of Agromeleorology 5 (2) : 15 – 26.
- Marsh A. (2004) *Performance analysis and Concept design: The parallel needs of Classroom & office*. Welsh School of Architecture. Between Research and Practice Conference, ARCC and EAAE Transactions on Architectural Education, Dublin.
- Morid S., Gosain A.K. y Keshari A. (2002) *Solar Radiation Estimation using Temperature-based, Stochastic and Artificial Neural Networks Approaches*. Nordic Hydrology, 33 (4), 2002,29 1-304. Disponible en web: <<http://www.iwaponline.com/nh/033/0291/0330291.pdf>>.
- Obanye I. (2009) *Integrating building energy simulation into the architectural design process*. Built Environment Education Annual Conference, BEECON 2006. Disponible en Web: <[http://www.cebe.heacademy.ac.uk/news/events/beecon2006/pdf/P18\\_Ike\\_Obanye.pdf](http://www.cebe.heacademy.ac.uk/news/events/beecon2006/pdf/P18_Ike_Obanye.pdf)>.
- Olgyay, V. (1963) *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Pfafferott J., Herkel S., Wapler J. (2005) *Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models*. Energy and Buildings. 37 (8) (2005) 844–852.
- Pfafferott J., Herkel S., Jäschke M. (2003) *Design of passive cooling by night ventilation: evaluation of a parametric model and building simulation with measurements*. Energy and Buildings 35 (11), 1129–1143.
- Reardon C., White S., McGee C., Shackel S. y Slapp B. (2001) *Your home: design for lifestyle and the future. Technical manual*. Commonwealth of Australia/Joint Initiative of the Australian Government and the Design and Construction Industries. ISBN-10: 1920840184. Disponible en web: <<http://www.yourhome.gov.au/technical/index.html>>.
- Rosales L., Hobaica M.E., Ghiaus C., Allard, F. (2007) *Potential of passive design strategies using the free-running temperature*. AIVC 28th Conference and Palenc 2nd Conference: Building Low Energy Cooling and Ventilation Tech-nologies in the 21st Century, 27-29 September 2007, Crete island, Greece. Vol II, 850-854. Disponible en web: <[http://www.inive.org/Ibase\\_Search/search-detail-airbase-001.asp?ID=100912](http://www.inive.org/Ibase_Search/search-detail-airbase-001.asp?ID=100912)>.
- Saberi O, Parisa S., Amir J. (2006) *Thermal comfort in architecture*. Presented in Windsor Conference, London, April 30, 2006. Web: <<http://nceub.commoncense.info/uploads/Saberi.pdf>>
- Seletsky P. (2005) *Digital Design and the age of Building simulation*. Revista digital AECbytes. Nº 19. Disponible en web: <[http://aecbytes.com/viewpoint/2005/issue\\_19.html](http://aecbytes.com/viewpoint/2005/issue_19.html)>.
- Shaviv E., Yezioro A. y Capeluto I. (2001) *Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy*. Renewable Energy. Volume 24, Issues 3-4, November 2001, Pages 445-452.
- Sosa M. E. y Siem G. (2004) *Manual de diseño para edificaciones energéticamente eficientes en el trópico*. Programa Agenda Ciudad. FONACIT/IDEC-FAU-UCV/EDC.
- Szokolay, S. V. (1987) *Thermal Design of Buildings*. Canberra, Australia: RAI Education Division. ISBN: 0909724814.
- Ullman G.D. (2003) *The mechanical design process*. Third edition, McGrawHill, ISBN0072373385
- Usón G. (2005) *Dimensiones de la sostenibilidad*, Ediciones UPC. ISBN: 8483017857. ISBN-13: 9788483017852.
- Zeiler W., Savanovic P. y Quanjel E. (2008) *Design decision support for conceptual design*. In I Horvath, Z Rusak (Eds.), *Tools and Methods of Competitive Engineering*. (pp. 1473-1482).