# Modelos matemáticos para estimar el confort térmico adaptativo en espacios interiores: Un estudio en la transición térmica de Ensenada, B.C.

Rincón-Martínez, J. C.\*, Martínez-Torres, K. E., González-Trevizo, M. E. v Fernández-Melchor, F.

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño. Universidad Autónoma de Baja California. Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana 3917, Zona Playitas, 22860 Ensenada, B.C.

Fecha de recepción: 10 de diciembre de 2019 - Fecha de aceptación: 12 de febrero de 2020

#### Resumen

Las condiciones adversas del ambiente térmico pueden influir negativamente en el bienestar, la eficiencia y el confort de las personas. Los estudios que abordan este fenómeno en México se han desarrollado predominantemente en sitios cuyo bioclima es cálido (seco y húmedo); sin embargo, también es posible encontrar algunos estudios en sitios con bioclima templado o semifrío. Este trabajo presenta los resultados de un estudio sobre confort térmico desarrollado con el enfoque adaptativo, en edificios educativos ventilados naturalmente, durante la transición térmica del periodo cálido al periodo frío en la ciudad de Ensenada, Baja California (bioclima templado-seco). El estudio es de tipo correlacional y fue analizado con 818 evaluaciones y el registro simultáneo de la temperatura, la humedad relativa y la velocidad de viento, durante el periodo comprendido del 20 de octubre al 24 de noviembre de 2016. Los cuestionarios aplicados se diseñaron con base en la ISO 10551 y la ANSI/ASHRAE 55; asimismo, los instrumentos de medición se establecieron con base en lo sugerido por la ISO 7726. Los datos recabados fueron procesados estadísticamente con los métodos de Regresión Lineal Simple y de Medias por Intervalos de Sensación Térmica. En cada caso, los parámetros térmicos estimados, respectivamente, fueron: 23.7 °C y 22.6 °C para la temperatura neutral; 21.4 °C a 26.0 °C y 19.7 °C a 25.7 °C para el rango de confort; y, y=0.2159x-1.1115 y y=0.61x-9.78 como modelos matemáticos para estimar el confort térmico.

*Palabras clave:* Adaptación al ambiente térmico, enfoque adaptativo, modelo térmico, sensación térmica, percepción térmica.

# Mathematical models to estimate adaptive thermal comfort indoors: A study on thermal transition period of Ensenada, B.C.

#### **Abstract**

People's comfort, performance and healthy can be affected by the adverse conditions of thermal environment. Thermal comfort phenomenon in Mexico has been studied in different cities with warm (dry and wet), temperate and semi-cold bioclimates. This paper shows thermal results of a study carried out with the adaptive approach from October 20 to November 24, 2016: thermal transition period of warm period to cold period in Ensenada, Baja California. City is located in

#### \*julio.rincon@uabc.edu.mx

Nota: Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 24, No. 1, 2020, ISSN: 2448-8364

Mexico's northwest and has a temperate-dry bioclimate. The study was correlational type and was analyzed with 818 evaluations and the simultaneous recording of temperature, relative humidity and wind speed. Used questionnaires were designed based on ISO 10551 and ANSI/ASHRAE 55; and environmental measurement instruments were based on ISO 7726. Data were processed by Averages by Thermal Sensation Intervals method. Data were processed with the Simple Linear Regression and Average by Thermal Sensation Intervals methods. In each case, the estimated thermal parameters, respectively, were: 23.7 °C and 22.6 °C for neutral temperature; 21.4 °C at 26.0 °C and 19.7 °C at 25.7 °C for thermal comfort range; y, y=0.2159x-1.1115 and y=0.61x-9.78 for mathematical models to estimate thermal comfort.

**Keywords:** Adaptation to thermal environment, adaptive approach, thermal model, thermal sensation, thermal perception.

#### 1. Introducción

De acuerdo con Olgyay (1963), la salud y el desempeño de las personas puede verse influenciado por las condiciones atmosféricas que presenta el día; así, mientras en algunos casos éstas pueden ser estimulantes para su desarrollo, en otros pueden reprimir los esfuerzos físicos y mentales que permiten realizarlas. En este sentido, el consumo energético requerido para lograr la adaptación al entorno está en función de las condiciones climáticas del sitio; en calor o frío extremo, el consumo energético es mayor.

El confort térmico es la «condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico» (ISO 7730, 2005), la cual, según la ANSI/ASHRAE 55 (2017), «se determina a partir de evaluaciones subjetivas». De acuerdo con Nikolopoulou y Steemers, (2003), la adaptación térmica es «el decremento gradual de respuesta del organismo a repetidas exposiciones a estímulos que se reciben de un medio ambiente específico».

En un espacio habitable, los parámetros que constituyen el ambiente térmico son de tipo meteorológico, fisiológico, espacial (arquitec tónico o natural) y circunstancial (Szokolay, 2004). La temperatura del aire, la temperatura radiante, la humedad relativa y la velocidad de viento, forman parte de los parámetros conside

rados en la primera de las clasificaciones y son los factores primarios que influyen principalmente en la sensación térmica de las personas (ANSI/ASHRAE 55, 2017).

En este sentido, la percepción térmica de las personas está en función de las sensaciones físicas y psicológicas que les genera el conjunto de estímulos derivados del ambiente térmico, la actividad desarrollada, el grado de arropamiento, la experiencia (historial térmico) y la expectativa; por ende, la sensación de confort térmico es producto del grado de adaptación que las personas manifiestan con relación a las condiciones del ambiente térmico inmediato. Dicha adaptación regularmente se da a notar con la forma de actuar que la persona adopta para conseguir las condiciones de confort térmico y, por ende, en el conjunto de actividades que emprende, de forma consciente e inconsciente, en la búsqueda de éste; las más comunes son la manipulación de vanos en la envolvente del espacio (apertura o cierre de ventanas y puertas), ajuste en el nivel de arropamiento como aislante térmico, ingesta de bebidas, actividad física y cambio de posición, entre otras.

Con el tiempo, el cuerpo humano adquiere cierta capacidad de adaptación debido a las variaciones constantes del ambiente, por lo que puede exponerse a condiciones térmicas extremas sin protección, y por cortos periodos de tiempo, sin sufrir daño alguno. No obstante, si la exposición es prolongada, el organismo presenta ciertos trastornos y, en consecuencia, su desempeño se reduce, con el riesgo de sufrir daños duraderos o irreparables en su salud (Ambriz, 2005). En este sentido, el confort térmico es una condición que permite contribuir en el logro de una mayor productividad, un estado de salud prolongado, buenas relaciones interpersonales e, inclusive, incentivar la creatividad de las personas.

El fenómeno del confort térmico, de acuerdo con Humpreys y Nicol (1998), puede ser estudiado a partir de dos enfoques: El adaptativo y el predictivo. Según estos autores (2002), el confort térmico estudiado desde las bases teóricas del enfoque adaptativo está en función de la temperatura media exterior, el tiempo de permanencia en el espacio, el nivel de actividad y las acciones emprendidas para conseguirlo. En este contexto, comportamiento humano es นท aspecto determinante en la búsqueda y la adquisición del confort térmico; si se produce un cambio en el ambiente que provoca incomodidad, personas reaccionan por instinto con el fin de restaurar las condiciones de comodidad (Humpreys v Nicol, 1998).

La temperatura de confort, también conocida como Temperatura Neutral (Tn), generalmente se obtiene de un análisis de regresión lineal que correlaciona las respuestas (subjetivas) dadas por las personas y las mediciones (objetivas) de los parámetros ambientales en los estudios de campo; correlación que ha permitido visualizar en edificios ventilados naturalmente, la dependencia de la temperatura neutra con la temperatura media exterior (Humpreys, 1978).

Por su parte, con el enfoque predictivo, la persona se estudia aislada de su hábitat, en condiciones controladas de laboratorio, es pasiva (pues espera a que el organismo por sí

mismo alcance el confort térmico), es de tipo fisiológico únicamente, considera a todas las personas universales y no atiende las condiciones específicas de historial, tecnología, nivel socioeconómico o características físicas del sujeto estudiado.

En este sentido, según el enfoque desde el cual se aborde este fenómeno, se abre una brecha en su estudio, pues con el enfoque predictivo se ha advertido una subestimación en la capacidad de adaptación de las personas y, por ende, el rango de confort resulta por debajo del que se podría obtener con el enfoque adaptativo, el cual, hasta ahora. ha sido aceptado predominantemente por los estudiosos del tema, al ofrecer indicadores térmicos más adecuados con las condiciones reales de los suietos de estudio considerar V características locales del sitio y de las personas.

Específicamente, en el ramo de la educación, existen algunas instituciones y dependencias gubernamentales alrededor del mundo que han atendido las condiciones de confort ambiental de los usuarios (iluminación, acústica, temperatura, etc.), con el fin de estimular el desempeño del aprendizaje. Por ejemplo:

• Middlebury College (2012) integra en el manual general de la universidad una política relacionada con el confort térmico de los estudiantes, el profesorado y el personal administrativo, en la cual se reconoce la importancia y el efecto de este fenómeno sobre la salud y la productividad de población su académica. En este manual recomienda que durante los periodos cálidos y de elevada humedad relativa (dos o más días consecutivos con 32.2 °C, o más, y una humedad relativa por encima del 60 %) se podrían tomar ciertas medidas para proteger la salud de la comunidad universitaria y ofrecer un mínimo de confort térmico que estimule

el trabajo efectivo. La política menciona que el aire acondicionado es la solución más costosa monetaria y ecológicamente, por lo que establece que sólo podría considerarse después de explorar y hacer uso de controles y de métodos naturales de enfriamiento (sombreado efectivo de ventanas con dispositivos de control solar, instalación de ventiladores de techo, ventilación cruzada, introducción de aire fresco en espacios cerrados: ventilación inducida).

- La división de arquitectos del estado de California (DSA, 2013) colabora con las autoridades escolares a fin de diseñar centros educativos de alto rendimiento que aseguren la óptima salud y la productividad de los estudiantes; para ello, ha generado una sección de escuelas sustentables en la que, entre otros aspectos, se atiende el confort térmico como directriz que favorece la calidad del ambiente interior de los espacios.
- Adicionalmente, existen instrumentos, como el Individualized Classroom Environment Questionnaire (ICEQ), que intentan medir el efecto que ejercen los factores del clima del aula sobre la conducta de los estudiantes a partir de un cuestionario que permite identificar la valoración de aceptación que los estudiantes y los docentes de secundaria perciben del ambiente del aula (Fraser, 1990).

Con lo anterior, y derivado de que, de acuerdo con el enfoque adaptativo, el confort térmico posee una fuerte relación con las condiciones climáticas que dan lugar en el sitio de estudio y con las características específicas de la población blanco, es que este trabajo presenta los resultados obtenidos con un estudio sobre confort térmico realizado a partir del enfoque adaptativo durante la transición térmica del periodo cálido al periodo frío en la ciudad de Ensenada, Baja California, aplicado a la

comunidad estudiantil de la Universidad Autónoma de Baja California. Actualmente, Ensenada es una urbe que no cuenta con indicadores térmicos locales que ofrezcan una referencia para la toma de decisiones en el diseño arquitectónico de espacios con actividad sedentaria. Los objetivos de este documento son:

- Determinar, a partir de la regresión lineal, los modelos matemáticos que permitan estimar el confort térmico en las condiciones específicas del caso, el periodo y la comunidad de estudio mencionados.
- Estimar los valores de la Tn y los rangos de confort térmico para las condiciones ya señaladas.
- Comparar los resultados obtenidos con los dos métodos estadísticos univariables utilizados para la correlación de datos recabados en campo: Medias por Intervalos de Sensación Térmica (Gómez-Azpeitia et al., 2007b) y Regresión Lineal Simple.

# 2. Metodología

El procedimiento metodológico empleado para el desarrollo de este estudio se basó en el enfoque adaptativo y la normativa internacional especializada en el tema (ANSI/ASHRAE 55, 2017; ISO 7730, 2005; ISO 8996, 2004; ISO 7726, 1998; ISO 10551, 1995), por lo que se agrupó en las siete secciones siguientes.

# 2.1. Caso de estudio y población blanco

El estudio se realizó en la ciudad de Ensenada, Baja California; su clima se clasifica en seco extremoso (BSO ks(e)) (García, 2004) y su bioclima se agrupa en templado-seco (Fuentes y Figueroa, 1990). Las condiciones climáticas anuales son representadas por una temperatura media de 17.3 °C, una humedad relativa media

de 75.8 %, una precipitación pluvial total de 217.3 mm y una velocidad media de viento de 2.5 m/s, cuya incidencia corresponde al rango suroeste-noroeste (SMN-CONAGUA, 2017).

La población blanco atendida con este estudio corresponde al groso poblacional de la ciudad de Ensenada. Según la pirámide de edades (COPLADE, 2017), ese groso está identificado por los 96,456 jóvenes ubicados en los quinquenios de 15 a 19 años y de 20 a 24 años de edad. Por facilidad de acceso y disponibilidad de recursos materiales. humanos, técnicos y financieros, la muestra poblacional que representa a la población blanco es la comunidad estudiantil de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), compuesta por jóvenes adultos de entre 18 y 23 años, habitantes de espacios interiores ventilados naturalmente, actividad sedentaria (1.2 met, de acuerdo con la ISO 8996, 2004) y resistencia térmica por arropamiento moderada (1.0 clo, de acuerdo con ANSI/ASHRAE 55, 2017), en promedio.

# 2.2. Diseño estadístico de la muestra poblacional

Para el diseño de la muestra poblacional se utilizó el programa Sample Size Calculator® (Creative Research Systems®, 2012), un nivel de confianza del 95 % y un intervalo de confianza del 5 %. De esta manera, el tamaño de la muestra resultó en 383 personas; no obstante, durante este periodo fue posible recabar 818 observaciones, de las cuales, 751 contaron con el grado de certidumbre necesario para realizar el procesamiento de datos (381 mujeres y 370 hombres).

#### 2.3. Periodo de estudio

De acuerdo con el análisis que caracteriza las condiciones climáticas típicas anuales del sitio de estudio, son cuatro los periodos térmicos representativos a partir de los cuales se puede llevar a cabo el estudio sobre confort térmico a efecto de conocer la variabilidad con la que los sujetos de estudio se adaptan periódicamente a las condiciones periódicas que se presentan en su lugar de residencia: El frío (febrero), el de transición térmica entre el frío y el cálido (mayo), el cálido (agosto) y el de transición térmica entre el cálido y el frío (noviembre) (Figura 1).

Sin embargo, este manuscrito sólo muestra los resultados obtenidos en noviembre, mes que corresponde con el transición térmica entre el periodo cálido (agosto) y el periodo frío (febrero) de un año típico en la ciudad de Ensenada: en este sentido, el levantamiento de encuestas en sitio se realizó del 20 de octubre al 24 de noviembre de 2016. Las condiciones climáticas promedio para este periodo son: Temperatura máxima, media y mínima de 21.3 °C, 16.0 °C y 11.4 °C, respectivamente; humedad relativa máxima, media y mínima de 86.0 %, 67.0 % y 44.8 %, respectivamente; precipitación total de 13.3 mm; y, velocidad de viento de 2.6 m/s del este (SMN-CONAGUA, 2017). Los valores térmicos estimados para los otros tres periodos, son objeto de otras publicaciones.

#### 2.4. Diseño del instrumento de medición

El cuestionario se diseñó en seis secciones y 37 preguntas, atendiendo algunos cuestionarios análogos de referentes especializados en el tema (Gómez-Azpeitia et al., 2007a, Stoops, 2001; Budawi, 2007; González, 2012) y lo que la normativa nacional (STPS, 2001) e internacional sugiere al respecto (ISO 10551, 1995; ANSI/ASHRAE 55, 2017; ISO 8996, 2004). Las secciones consideradas en la estructura del cuestionario fueron:

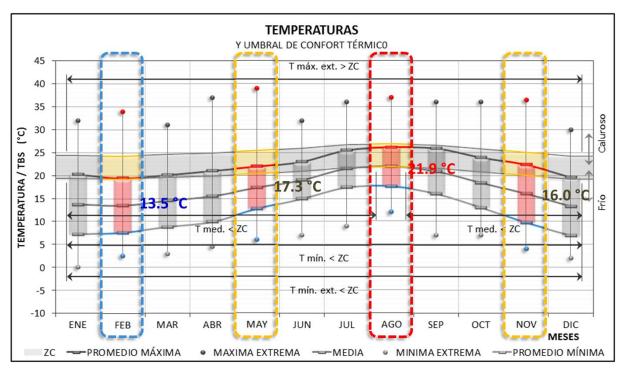


Figura 1. Periodos térmicos representativos de un año típico en la ciudad de Ensenada.

Fuente: Elaboración propia con base en SMN-CONAGUA (2017).

- A. Datos de control
- B. Sensación del ambiente interior del espacio
- C. Información del participante
- D. Preferencia del ambiente interior del espacio
- E. Información del espacio
- F. Información complementaria

Las preguntas relacionadas con la sensación térmica del ambiente se basaron en la escala subjetiva de siete puntos contenida en la ISO 10551 (1995) y la ANSI/ASHRAE 55 (2017), y fue adaptada como se indica en la Tabla 1.

# 2.5. Variables ambientales y equipo de medición y registro

Las variables del ambiente térmico registradas simultáneamente con la aplicación de cuestionarios fueron: Temperatura de Bulbo Seco (TBS), Humedad Relativa (HR) y

Velocidad de Viento (VV), entre otras; así como, la resistencia térmica por arropamiento y la actividad metabólica.

La TBS, la HR y la VV fueron medidas y registradas con un monitor de ambiente térmico de tres arreglos (mca. 3M, mod. QUESTemp 36-3) (Figura 2). Este equipo de monitoreo ambiental cuenta con una resolución de 0.1 °C para la TBS, 0.1 % para la HR y 0.1 m/s para la VV, y una precisión de ± 0.5 °C para la TBS, ± 5.0 % para la HR y ± (4.0 % lectura + 0.1 m/s) para la VV. La selección, la distribución y la operación del equipo de medición se realizó con base en la ISO 7726 (1998) y la ANSI/ASHRAE 55 (2017), respectivamente, lo que permite clasificar a la base de datos obtenida como clase I de acuerdo con Brager y de Dear (1998).

Tabla 1. Escala de sensación térmica utilizada en los cuestionarios aplicados en campo.

Sensación térmica	Escala de ISO 10551 (1995)	Escala adaptada al estudio
Mucho calor	+ 3	7
Calor	+ 2	6
Algo de calor	+ 1	5
Ni calor, ni frío	0	4
Algo de frío	- 1	3
Frío	- 2	2
Mucho frío	- 3	1

Fuente: Elaboración propia con base en ISO 10551 (1995) y ANSI/ASHRAE 55 (2017).

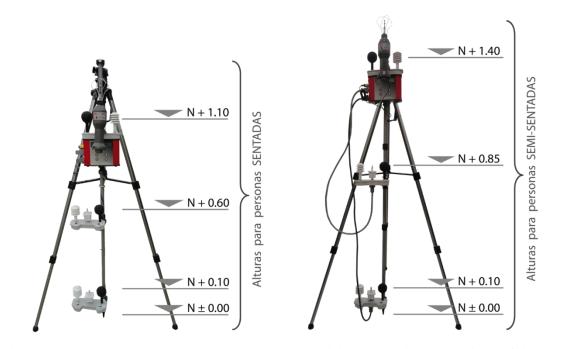


Figura 2. Instrumentos y alturas empleados para la medición y el registro de variables físicas en evaluaciones con personas sentadas y semi-sentadas.

Fuente: Elaboración propia con base en ISO 7726 (1998) y ANSI/ASHRAE 55 (2017).

Los espacios de evaluación fueron aulas de clase, laboratorios y talleres de dibujo. En las aulas de clase —donde el mobiliario está conformado por butacas con paleta o mesabancos y, por ende, la posición de las personas es sentada—, los instrumentos se dispusieron al centro del espacio con las siguientes alturas: 0.1 m, 0.6 m y 1.1 m, correspondientes a las alturas promedio del talón, el abdomen y la cabeza de una persona sentada (ISO 7726,

1998; ANSI/ASHRAE 55, 2017). Por su parte, en los laboratorios y los talleres—donde el plano de trabajo se encuentra a una altura de 1.2 m y las personas descansan sobre bancos de 0.9 m de altura y, por ende, no es posible considerarlas sentadas ni de pie—, las alturas de los instrumentos fueron adaptadas a: 0.1 m, 0.85 m y 1.4 m, respectivamente (Figura 2 y Figura 3).





Figura 3. *Izquierda*. Localización y alturas de los instrumentos de medición en aulas tipo. *Derecha*. Localización y alturas de los instrumentos de medición en talleres de dibujo.

Fuente: Capturas fotográficas realizadas en sitio.

# 2.6. Aplicación de cuestionarios en sitio

Los edificios en los que se aplicó el estudio son de tres niveles en promedio, son ventilados naturalmente y su sistema constructivo es principalmente concreto armado y bloque; en casos aislados, la ventilación natural se apoya de ventiladores mecánicos.

Los cuestionarios se aplicaron diariamente, bajo un esquema aleatorio de selección de grupos, donde se consideraran estudiantes de tercer semestre o posterior —con el fin de garantizar una estancia mínima de un año en la ciudad de Ensenada—, un matrícula estudiantil mixta: mujeres-hombres y unos horarios de clase próximos a los momentos térmicos extremos de un día típico: frío y cálido (de 07 h 00 a 09 h 00 y de 15 h 00 a 17 h 00, respectivamente). Simultáneamente a la respuesta de cuestionarios y al registro de la percepción térmica por parte de los estudiantes, se registraron las lecturas obtenidas con el equipo de medición. En promedio, la duración de cada encuesta (evaluación) fue de 18 min.

Con la aplicación de este procedimiento fue posible recabar 818 evaluaciones en 42 espacios interiores diferentes.

#### 2.7. Procesamiento de datos

El procesamiento de datos se llevó a cabo simultáneamente con los métodos estadísticos de Regresión Lineal Simple (RLS) (Cardona et al., 2013) y de Medias por Intervalos de Sensación Térmica (MIST) (Gómez-Azpeitia et al., 2007b). El primer método consiste en obtener la línea de regresión a partir del diagrama de dispersión generado con el conjunto de datos pares (voto de confort magnitud de variable ambiental); temperatura de confort resulta de la intersección de la línea de regresión y el valor 4 del eje de las ordenadas (categoría de sensación térmica ni calor, ni frío), mientras que el rango de confort resulta del cruce de la línea de regresión con los valores 3.5 y 4.5 (González y Bravo, 2003), o, 3.0 y 5.0 (Fanger, 1972), del eje de las ordenadas.

Para calcular matemáticamente la línea de regresión, Cardona *et al.* (2013) sugieren hacer uso de la ecuación de la recta donde la variable dependiente *Y* está determinada por la variable independiente *X*:

$$y = a + b x \tag{1}$$

Dónde:

a = ordenada en el origen (valor de *Y* donde la línea de regresión cruza el eje vertical).

b = pendiente de la recta (representa qué tanto cambia la variable dependiente *Y* por cada unidad de incremento de la variable independiente *X*).

Asimismo, la ecuación para calcular la pendiente de la recta, también conocida como razón de cambio, es:

$$b = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{2}$$

Tanto *a* como *b* son consideradas constantes numéricas porque para cualquier línea recta dada sus valores no cambian.

Mientras tanto, el segundo método consiste en agrupar los votos de confort por categoría de sensación térmica (ST) y obtener la media de las magnitudes de la variable ambiental en cada caso; agregar y sustraer ± 1 desviación estándar (DS) (rango de confort reducido) y ± 2 DS (rango de confort extenso) a la media de cada nivel; graficar los pares de datos obtenidos y trazar las líneas de regresión simple; la temperatura neutra (Tn) y los rangos de confort resultan del cruce de éstas y el nivel 4 de ST.

De acuerdo con Ruiz (2004), la desviación estándar, también conocida como desviación típica, es la medida del grado de dispersión de un *conjunto de datos*<sup>1</sup> (variables cuantitativas, cantidades racionales o variables de intervalo) respecto a su valor promedio —medida en las mismas unidades que la variable analizada—; en otras palabras, es la variación esperada respecto a la media aritmética.

En ambos métodos de procesamiento de datos, los modelos matemáticos de confort térmico corresponden a la ecuación lineal que resulta de cada línea de regresión. Para mayor detalle acerca de éstos, consultar a Rincón (2015).

# 3. Resultados y discusión

El grado de influencia que cada una de las variables físicas registradas ejerció sobre la ST de los sujetos, según su coeficiente de determinación (r²), fue: 1) TBS (r²= 0.3217); 2) HR (r²= 0.1056); y, 3) VV (r²= 0.0148). Por ello, los siguientes resultados corresponden exclusivamente a la correlación de la TBS y la ST percibida, estimados con los métodos estadísticos ya descritos.

Con el método de RLS (Figura 4) se obtuvo una Tn de 23.7 °C y un rango de confort de 21.4 °C a 26.0 °C, equivalente a una amplitud equidistante de ± 2.3 K. En este caso, la temperatura de confort corresponde con el valor de la abscisa que resulta de intersectar la línea de regresión con el nivel 4 de ST; mientras que el rango de confort, con el de las abscisas que resultan del cruce entre la regresión lineal y los niveles 3.5 y 4.5 de ST (González y Bravo, 2003). De acuerdo con Bojórquez (2010), el grado de correlación es bajo, dado que el valor de la r² resultó en 0.3071, con una pendiente de la recta igual a 0.2159.

El modelo matemático para estimar el confort térmico se determinó en y=0.2159x-1.1115; dónde, al sustituir x con la magnitud de la temperatura ambiente del espacio interior es posible determinar si éste presenta condiciones de confort térmico, siempre que

variable y cada fila un registro del conjunto de datos en cuestión (Sánchez, 2007).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Un conjunto de datos, también conocido como dataset, es una colección de datos normalmente tabulada que corresponde con el contenido de una matriz estadística (base de datos), donde cada columna representa una

el resultado se encuentre en un valor de 3.5 a 4.5.

#### PERIODO DE TRANSICIÓN TÉRMICA

#### Temperatura De Bulbo Seco - Sensación Térmica

Evaluaciones procesadas: 751 (381 mujeres, 370 hombres); nivel de actividad: 3 niveles

_	Confort			
SENSACIÓN TÉRMICA	3.5	4.0	4.5	
	ZCi	Neutral	ZCs	
	21.4	23.7	26.0	
Umbral	-2.3		2.3	

$r^2 =$	0.3071
r=	0.5542

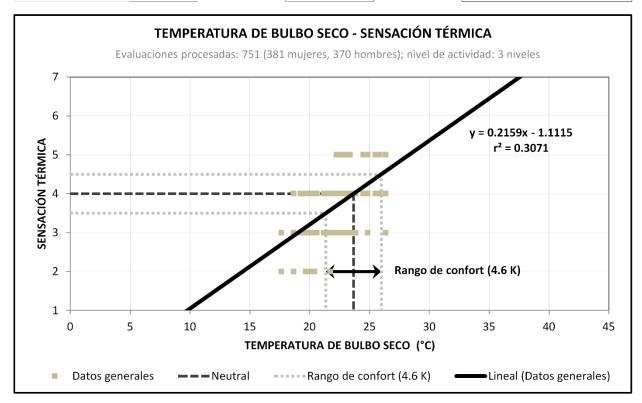


Figura 4. Correlación de la TBS y la ST a partir del método estadístico de RLS.

Fuente: Elaboración propia con base en Cardona et al. (2013) y González y Bravo (2003).

Por su parte, con el método de MIST (Figura 5) se estimó una Tn de 22.6 °C, con un rango reducido de confort de 21.2 °C a 24.1 °C y un rango extenso de confort de 19.7 °C a 25.7 °C; equivalente a una amplitud equidistante de  $\pm$  1.5 K y  $\pm$  3.0 K, respectivamente.

En este caso, la temperatura de confort corresponde con la abscisa que resulta de intersectar la línea de regresión media con el nivel 4 de ST; mientras que los límites de los rangos reducido y extenso de confort corresponden con la abscisa que resulta de intersectar la línea de regresión de  $\pm 1$  DS y  $\pm 2$  DS, respectivamente, con el nivel 4 de ST (Gómez-Azpeitia *et al.*, 2007b). De acuerdo con Bojórquez (2010), el grado de correlación de cada uno de estos casos es alta, ya que se obtuvo

una  $r^2$ =0.9781 para la Tn;  $r^2$ =0.9942 y  $r^2$ =0.9470 para los límites del rango reducido de confort; y,  $r^2$ =0.9968 y  $r^2$ =0.9005 para los límites del rango

extenso de confort. El valor de la pendiente en cada caso oscila alrededor de 0.6.

#### Temperatura De Bulbo Seco - Sensación Térmica

Evaluaciones procesadas: 751 (381 mujeres, 370 hombres); nivel de actividad: 3 niveles

ST	Escala	-2 DS	-1 DS	Media	+1 DS	+2 DS	Votos
Mucho calor	7						
Calor	6						
Algo de Calor	5	21.5	22.8	24.1	25.5	26.8	82
Ni calor, Ni Frío	4	19.5	21.0	22.5	24.0	25.5	386
Algo de Frío	3	18.0	19.7	21.5	23.2	25.0	241
Frío	2	16.3	17.7	19.1	20.6	22.0	42
Mucho frío	1						
	Ecuación	y = 0.58x - 7.37	y = 0.60x - 8.62	y = 0.61x - 9.78	y = 0.61x - 10.77	y = 0.61x - 11.52	
	r <sup>2</sup>	0.9968	0.9942	0.9781	0.9470	0.9005	
	Neutral	19.7	21.2	22.6	24.1	25.7	
	Umbral	-3.0	-1.5		1.5	3.0	
	Mucho calor Calor Algo de Calor Ni calor, Ni Frío Algo de Frío Frío	Mucho calor   7     Calor   6     Algo de Calor   5     Ni calor, Ni Frío   4     Algo de Frío   3     Frío   2     Mucho frío   1     Ecuación   r²     Neutral	Mucho calor   7     Calor   6     Algo de Calor   5   21.5     Ni calor, Ni Frío   4   19.5     Algo de Frío   3   18.0     Frío   2   16.3     Mucho frío   1     Ecuación   y = 0.58x -7.37     r²   0.9968     Neutral   19.7	Mucho calor 7   Calor 6   Algo de Calor 5 21.5 22.8   Ni calor, Ni Frío 4 19.5 21.0   Algo de Frío 3 18.0 19.7   Frío 2 16.3 17.7   Mucho frío 1 Ecuación y = 0.58x -7.37 y = 0.60x -8.62   r² 0.9968 0.9942   Neutral 19.7 21.2	Mucho calor7Calor6Algo de Calor5 $21.5$ $22.8$ $24.1$ Ni calor, Ni Frío4 $19.5$ $21.0$ $22.5$ Algo de Frío3 $18.0$ $19.7$ $21.5$ Frío2 $16.3$ $17.7$ $19.1$ Mucho frío1Ecuación $y = 0.58x - 7.37$ $y = 0.60x - 8.62$ $y = 0.61x - 9.78$ $r^2$ $0.9968$ $0.9942$ $0.9781$ Neutral19.721.222.6	Mucho calor7Calor6Algo de Calor521.522.824.125.5Ni calor, Ni Frío419.521.022.524.0Algo de Frío318.019.721.523.2Frío216.317.719.120.6Mucho frío1Ecuación $y = 0.58x - 7.37$ $y = 0.60x - 8.62$ $y = 0.61x - 9.78$ $y = 0.61x - 10.77$ $r^2$ $0.9968$ $0.9942$ $0.9781$ $0.9470$ Neutral19.721.222.624.1	Mucho calor7Calor6Algo de Calor521.522.824.125.526.8Ni calor, Ni Frío419.521.022.524.025.5Algo de Frío318.019.721.523.225.0Frío216.317.719.120.622.0Mucho frío1Ecuación $y = 0.58x - 7.37$ $y = 0.60x - 8.62$ $y = 0.61x - 9.78$ $y = 0.61x - 10.77$ $y = 0.61x - 11.52$ $r^2$ $0.9968$ $0.9942$ $0.9781$ $0.9470$ $0.9005$ Neutral19.721.222.624.125.7

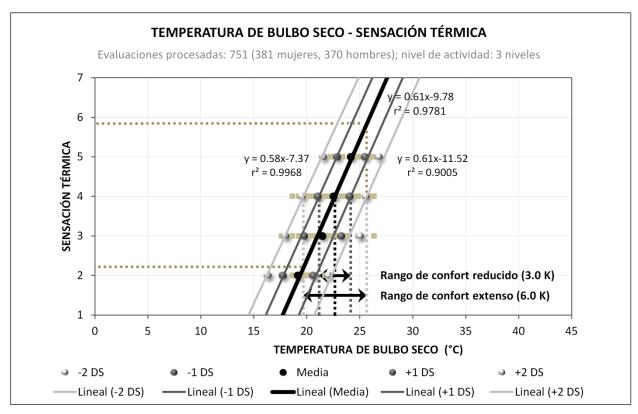


Figura 5. Correlación de la TBS y la ST a partir del método estadístico de MIST.

Fuente: Elaboración propia con base en Gómez-Azpeitia et al. (2007b).

Los modelos matemáticos obtenidos para estimar el confort térmico, son: y=0.61x-9.78

para la Tn; y, y=0.58x-7.37 y y=0.61x-11.52 para los límites inferior y superior del rango

extenso de confort, respectivamente. Al sustituir x en la primera ecuación (Tn) con la magnitud de la temperatura ambiente del espacio interior, es posible determinar si éste presenta condiciones de confort térmico, siempre que el valor obtenido resulte entre 2 y 6 —valores exclusivamente referentes que resultan con la sustitución de x en los modelos térmicos de los límites de confort, o, en su caso, con la ordenada que resulta de la prolongación de las abscisas obtenidas con los límites de confort hasta intersectar con la regresión lineal media—.

De acuerdo con el mismo diagrama (Figura 5), los votos de confort emitidos por los sujetos reflejaron mayor concentración en las categorías de ST ubicadas por debajo de la categoría de *Ni calor, ni frío*, lo que permite advertir menor adaptación a temperaturas por debajo de la Tn que por encima de ésta, pese al conjunto de acciones que las personas emprenden para conseguir el confort térmico (modificación del nivel de arropamiento, cambio de postura, manipulación de la apertura y el cierre de puertas y ventanas, ingesta de bebidas, empleo de accesorios o dispositivos de ventilación, cambio de actividad, etc.).

Como se puede observar, con ambos métodos estadísticos fue posible estimar una Tn y un rango de confort térmico (en este caso, el rango reducido de confort obtenido con el MIST, parcialmente no se abordará a efecto de parear los valores obtenidos con ambos métodos). Con ello, la Tn obtenida para la transición térmica del periodo cálido al periodo frío en la ciudad de Ensenada fue de 23.7 °C con la RLS y de 22.6 °C con el MIST, una diferencia de 1.1 K entre ambos valores. Por su parte, el límite inferior del rango de confort obtenido con la RLS fue de 21.4 °C, mientras que el obtenido con el MIST fue de 19.7 °C; de igual manera, el límite superior estimado para el rango de confort con la RLS fue de 26.0 °C, mientras que el obtenido con el MIST fue de 25.7 °C; lo que marca una diferencia de 0.7 K y 0.3 K, respectivamente. Dichas diferencias oscilan alrededor de 0.7 K, en promedio, lo que en el contexto del ambiente térmico es imperceptible. Esto permite validar los valores obtenidos con cualquiera de los dos métodos estadísticos aplicados a la correlación de datos, aunque cabe mencionar que, en todos los casos (Tn y límites del rango de confort), los valores estimados con la RLS están ligeramente por encima de los obtenidos con el MIST, no obstante, con este último método se logra una mayor amplitud del rango de confort.

En este sentido, si se tomaran como referencia los 32.2 °C del límite superior del rango de confort térmico sugerido por Middlebury College (2012) —descrito en la introducción de este documento—, se puede observar que hay una diferencia de 6.0 °C aproximadamente con relación a lo estimado con este estudio. Cabe aclarar que este referente corresponde al periodo cálido del año en la ciudad de Middlebury, Estados Unidos, quien presenta veranos cálidos y húmedos, e inviernos fríos y nublados.

No obstante, de acuerdo con el estudio de Rincón (2015, p. 391), el cual atendió un caso en condiciones similares a las descritas en este manuscrito, los indicadores térmicos estimados para el periodo de transición entre el cálido y el frío, corresponden a 22.2 °C para la Tn y a 20.4 °C – 25. 2 °C para el rango de confort térmico, lo que permite advertir una fuerte coincidencia con los valores estimados con el estudio descrito en este documento. Cabe aclarar que la diferencia más importante entre ambos referentes mencionados es la humedad relativa del ambiente que da lugar en el periodo de estudio: Mientras en la ciudad de Pachuca se tiene una HR de 78.2 %, en Ensenada se tiene una de 67.0 %; de ahí las pequeñas diferencias obtenidas en la estimación de los indicadores térmicos.

Por último, de acuerdo con la siguiente ecuación universal de Auliciems & Szokolay (1997) para estimar la temperatura neutra:

$$Tn = 17.6 + 0.31 T_{med}$$
 (3)

Dónde:

Tn = Temperatura neutra.

 $T_{med}$  = Temperatura media del periodo en estudio (mensual / anual).

Se pueden estimar los siguientes valores de confort térmico: 22.6 °C para la Tn y de 20.1 °C a 25.1 °C para el rango de confort térmico (Tn+2.5 y Tn-2.5, respectivamente). En este sentido, se puede apreciar que los resultados obtenidos con este estudio resultan de igual manera coincidentes con lo que se podría esperar aplicando la ecuación lineal de Auliciems & Szokolay (1997), la cual es una de las más aceptadas por los estudiosos de este fenómeno a nivel internacional, pues ésta, a diferencia de los modelos de confort térmico obtenidos con este estudio, considera la temperatura media exterior del periodo de estudio.

#### 4. Conclusiones

El confort térmico estimado para las condiciones específicas en las que se desarrolló el estudio, se presentan en la Tabla 2.

Los modelos matemáticos que permiten estimar el confort térmico son, por un lado, con la RLS, y=0.2159x-1.1115, cuyo resultado debe encontrarse entre 3.5 y 4.5 al sustituir la x con la temperatura ambiente del espacio interior, en aras de conocer si las condiciones del ambiente térmico de éste se encuentran o no en confortabilidad térmica; y, por otro, con el MIST, v=0.61x-9.78, cuyo resultado debe encontrarse entre 2 y 6. El rango de referencia en el que puede oscilar el resultado de cada modelo matemático mencionado depende, invariablemente, de la pendiente de la recta que resultó de la regresión lineal en cada caso; por ello, entre más próxima resulte la pendiente a la unidad, la amplitud del rango resultará más pronunciada (nunca excediendo los valores de 0 a 7, correspondientes con las categorías subjetivas de ST utilizadas en el estudio).

El coeficiente de determinación (r²) estimado con el MIST resultó más elevado debido a que la regresión lineal de éste deriva de un conjunto de hasta siete pares de datos (cantidad equivalente a las categorías de ST que intervienen en el estudio), mientras que la regresión lineal del método de RLS es trazada con los pares de datos obtenidos con el estudio en su totalidad (cantidad equivalente al total de observaciones procesadas).

Tabla 2. Valores de confort térmico estimados con el uso de los métodos estadísticos de RLS y de MIST.

Parámetros de confort térmico estimados	Método de RLS	Método de MIST
Límite superior del rango de confort térmico	26.0 °C	25.7 °C
Temperatura neutra	23.7 °C	22.6 °C
Límite inferior del rango de confort térmico	21.4 °C	19.7 °C
Amplitud del rango de confort	± 2.3 K	± 3.0 K
Coeficiente de determinación (r²)	0.3071	0.9781
Modelo matemático de confort térmico	y=0.2159x-1.1115 *	y=0.61x-9.78 *
	(3.5 < y > 4.5)	(2 < y > 6)

\* x corresponde con la temperatura ambiente interior del espacio de evaluación.

Fuente: Elaboración propia con base en Cardona et al. (2013) y Gómez-Azpeitia et al. (2007b).

La diferencia identificada entre los valores térmicos estimados con el método de RLS y el método de MIST oscila alrededor de 0.7 K. lo que, desde el contexto del ambiente térmico en el que se desenvuelve el humano, es imperceptible; razón que permite establecer una validación entre los valores que se obtuvieron con cualquiera de los métodos empleados. estadísticos La diferencia observada se debe invariablemente al procedimiento de correlación de datos que deriva de cada uno de los métodos aplicados, ya que, en ambos casos, se partió de la misma base de datos recabada con los estudios de campo.

No obstante, se identificó que cuando las condiciones del ambiente térmico representan variabilidad continua, los sujetos emprenden acciones, de forma consciente e inconsciente, que les permiten conseguir nuevamente una percepción eventual de equilibrio térmico entre el entorno inmediato y su organismo. Las acciones comúnmente adoptadas son: Cambio en el nivel de arropamiento, ingesta de bebidas, cambio de posición, movilidad, resguardo en un microclima que asegure pronta adaptación, operación dispositivos de acondicionamiento natural: puertas / ventanas, el uso eventual de equipos mecánicos de acondicionamiento artificial y el cambio de actividad física, entre otros.

A partir de los referentes citados en la sección de la Discusión, es posible apreciar la validez de los resultados obtenidos con este estudio, pues los valores estimados presentan una aproximación estrecha con los obtenidos en el estudio de Rincón (2015) —quien se enfocó en un caso que presentaba condiciones similares a las de este estudio— y con los que podrían obtenerse al aplicar la ecuación lineal de Auliciems & Szokolay (1997). Con esto, tanto

los modelos matemáticos como los indicadores de confort térmico obtenidos permiten ofrecer un grado de certidumbre elevado, por lo que podrían contribuir de forma significativa en la toma de decisiones de diseño arquitectónico de edificios dirigidos a actividades sedentarias en la ciudad de Ensenada, Baja California. De forma paralela, los resultados obtenidos con este estudio pueden impactar positivamente en la habitabilidad de los espacios interiores al ofrecer un ambiente con rangos térmicos favorables para el desempeño armónico de las actividades, el bienestar de las personas y la eficiencia energética de los edificios, por dar algunos ejemplos.

# **Agradecimientos**

Se agradece al Programa para el Desarrollo Profesional Docente para el Tipo Superior (PRODEP), México, por financiar el proyecto denominado Confort Térmico en Espacios Interiores: Un Estudio en Bioclima Templado Seco en Ensenada, Baja California, con folio UABC-PTC-607, en el marco de Convocatoria 2016 para Apoyo a la Incorporación de Nuevos Profesores de Tiempo Completo, del cual deriva esta publicación.

Asimismo, a la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), cuyo número de registro del proyecto es 402/395/E, por brindar las facilidades para los trabajos de campo de esta investigación en las diferentes unidades académicas de su campus Ensenada, específicamente, dentro de la Facultad de Ciencias Administrativas y Sociales (FCAyS), la Facultad de Ciencias Marinas (FCM) y la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño (FIAD).

# Referencias

- Ambriz, J. (2005). La temperatura afecta la productividad. *Investigación y Desarrollo ID*, México. http://www.invdes.com.mx
- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, ANSI/ASHRAE 55 (2017). Thermal environmental conditions for human occupancy, Atlanta.
- Auliciems, A. & Szokolay, S. (1997). Thermal Comfort. *Notes of passive and low energy architecture international*, núm. 3, Brisbane: PLEA University of Queensland.
- Bojórquez, G. (2010). Confort térmico en exteriores: Actividades en espacios recreativos, en Clima Cálido Seco Extremo. Tesis de Doctorado, Universidad de Colima, Facultad de Arquitectura y Diseño, Colima, México.
- Brager, G. & de Dear. R. (1998). Thermal adaptation in the build environment: A literature review. *Energy and Buildings*, 27.
- Cardona, D., González, J., Rivera, M. y Cárdenas, E. (2013). *Inferencia estadística. Módulo de regresión lineal simple*, Universidad del Rosario. Bogotá, Colombia. https://repository.urosario.edu.co/flexpaper/handle/10336/10447/BI\_147-Web.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- COPLADE (2017). *Publicaciones sociodemográficas | Baja California*, Baja California, México. http://www.copladebc.gob.mx/publicaciones/2017/Mensual/Ensenada%202017.pdf.
- Creative Research Systems® (2012). Sample size calculator®. https://www.surveysystem.com/sscalc.htm
- DSA (2013). Indoor Environment Quality. *Sustainable schools: Sustainable design*, Division of the State Architects (DSA), United States of America. https://sustainableschools.ca/
- Fanger, O. (1972). Thermal comfort, Ed. McGraw-Hill, New York.
- Fraser, B. (1990). *Individualized classroom environment questionnaire*, Melbourne, Australia: Australian Council for Educational Research.
- Fuentes, V. y Figueroa, A. (1990). *Criterios de adecuación bioclimática en la Arquitectura*, Instituto Mexicano del Seguro Social, México.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen [para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana], Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Gómez-Azpeitia, G., Ruiz, R., Bojórquez, G. y Romero, R. (2007)a. *Confort térmico y ahorro de energía* en la vivienda económica en México, regiones de clima cálido seco y húmedo, Comisión Nacional del Fondo para Vivienda (CONAFOVI), México.

- Gómez-Azpeitia, G., Ruiz, R., Bojórquez, G. y Romero, R. (2007)b. *Monitoreo de condiciones de confort térmico: Reporte técnico (Producto 3), CONAFOVI 2004-01-20*, Comisión Nacional del Fondo para Vivienda, Proyecto Confort Térmico y Ahorro de Energía en la Vivienda Económica en México, Regiones de Clima Cálido Seco y Húmedo, Colima, México.
- González, F. (2012). Zona de confort higrotérmico para adultos jóvenes de la ciudad de México. Tesis de Maestría, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional, México.
- González, E. y Bravo, G. (2003). Sobre el confort térmico: Temperaturas neutras en el trópico, en Rodríguez, M. (comp.). *Estudios de Arquitectura Bioclimática*, Anuario 2003, vol. V, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México.
- Humphreys, M. (1978). Outdoor temperatures and comfort indoors. *Building Research & Practice*, 6 (2), 92-105. https://doi.org/10.1080/09613217808550656
- Humphreys, M. & Nicol, F. (2002). The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings*, 34, pp. 667-684.
- Humphreys, M. & Nicol, F. (1998). Understanding the adaptive approach to thermal comfort. *ASHRAE Transactions, Technical Bulletin, 104 (1)*, Atlanta: ASHRAE.
- INEGI (2009). Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Ensenada, Baja California (Clave geoestadística 02001), Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- International Organization for Standardization, ISO 10551 (1995). *Ergonomics of thermal environment Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales*, Ginebra.
- International Organization for Standardization, ISO 7726 (1998). *Ergonomics of the thermal environment Instruments for measuring physical quantities*, Second edition, Ginebra.
- International Organization for Standardization, ISO 8996 (2004). *Ergonomics of the thermal environment Determination of metabolic rate*, Second edition, Ginebra.
- International Organization for Standardization, ISO 7730 (2005). Ergonomics of the thermal environment Analytical determination and Interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, Third edition, Ginebra.
- Middlebury College (2012). Thermal comfort policy. *College handbook: Other policies and information*, Middlebury College, United States of America. http://www.middlebury.edu
- Ministerio de Educación (2015). *Plan estratégico de infraestructura escolar*, Departamento de Infraestructura Escolar, Santiago, Chile.
- Nikolopoulou, M. & Steemers, K. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, 35, 95-101. https://doi.org/10.1016/s0378-7788(02)00084-1.

- Olgyay, V. (1963). Arquitectura y Clima. Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas, Ed. Gustavo Gili, Barcelona.
- Oropeza-Perez, A., Petzold-Rodriguez & Bonilla-Lopez, C. (2017). Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling. *Energy and Buildings*, 145, 251-258.
- Proyecto Banco Interamericano de Desarrollo (2015). *Proyecto BID aprendizaje en las escuelas del siglo XXI*, Washington DC.
- Rincón, J. (2015). Confort térmico en bioclima semi-frío: Estimación a partir de los enfoques de estudio adaptativo y predictivo. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma Metropolitana, México. https://uabc.academia.edu/JulioRincon/Thesis-Chapters.
- Romero, R., Bojórquez, G., Corral, M. y Gallegos, R. (2013) Energy and the occupant's thermal perception of low-income dwellings in hot-dry climate: Mexicali, México, *Renewable Energy*, vol. 49, 267-270.
- Ruíz, D. (2004). *Manual de Estadística*, Universidad Pablo de Olavide, España, ISBN 84-688-6153-7. http://www.eumed.net/cursecon/libreria/drm/drm-estad.pdf
- SMN-CONAGUA (2017). Datos climáticos registrados por la Estación Meteorológica Automática BC-02 Ensenada, Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA), periodo 2000-2017.
- Stoops, J. (2001). The physical environment and occupant thermal perceptions in office buildings: an evaluation of sampled data from five european countries. Doctoral thesis, Chalmers University of Technology.
- STPS (2001). NOM-015-STPS-2001. Condiciones Térmicas Elevadas o Abatidas Condiciones de Seguridad e Higiene, Secretaria del Trabajo y Previsión Social, México.
- Szokolay, S. (2004). Introduction to architectural science: The basis of sustainable design, *Architectural Press*, Elsevier, London.