

Confort térmico: percepción, teoría y simulación en aulas naturalmente ventiladas en el trópico

Thermal comfort: perception, theory and simulation, in naturally ventilated classrooms in the tropics

Olga Lucia Montoya (Autor principal / Autor de Contacto)

Filiación: Universidad de San Buenaventura, Cali

Dirección: Carrera 122 # 6-65. Cali - Colombia, Sur América. CP:760001

Correo: olmontoy@usbcali.edu.co

Carlos Herrera

Filiación: Universidad del Valle

Dirección: Calle 13 # 100-00, Cali, Colombia. CP:760001

Correo: carlos.herrera@correounivalle.edu.co

Código del manuscrito: 02_003

Fecha de aceptación: 04/10/2019

Resumen

Diseñar aulas térmicamente confortables es una necesidad aceptada por la mayoría de los arquitectos e ingenieros. Sin embargo, es reconocida la dificultad para determinar el confort en las distintas fases del proyecto. Para validar el confort, hay variedad de herramientas y softwares, entre ellos el EnergyPlus, con el fin de acercar los diseños a la realidad. Programas como el EnergyPlus, se usan de manera extendida para identificar los parámetros ambientales y energéticos; y también arrojan resultados sobre el confort térmico bajo diferentes modelos, como el analítico bajo los índices PMV y PPD. La presente contribución tiene como objetivo comparar el confort percibido, con el PMV bajo el modelo teórico y el PMV arrojado por la simulación, con el fin de determinar falencias y fortalezas.

El trabajo de campo se realizó en Cali, Colombia, en clima tropical, en 2 aulas ventiladas naturalmente. La metodología fue de auditoría ambiental, con un componente subjetivo y uno objetivo. El componente subjetivo consistió en una encuesta a 61 estudiantes de secundaria, durante una clase regular en agosto del año 2017. El componente objetivo: mediciones de las variables de confort térmico en simultáneo con la encuesta. Los resultados muestran diferencias significativas entre las tres metodologías. El modelo teórico resultó más exigente que la realidad expresada por los estudiantes; mientras la simulación predijo una situación de confort diferente, a pesar de presentar temperaturas cercanas a la realidad medida. Lo anterior cuestiona el método más adecuado al momento para predecir el confort en las aulas naturalmente ventiladas.

Palabras claves: Confort térmico, PMV, PPD, aulas ventiladas naturalmente, simulación

Abstract

Designing thermally comfortable classrooms is a necessity accepted by most architects and engineers. However, the difficulty in determining comfort in the different phases of the project is also recognized. To validate comfort in the design phases, there are a variety of tools and software, including the EnergyPlus, in order to overcome this difficulty and bring the designs closer to reality. Programs such as EnergyPlus are used extensively to identify environmental and energy parameters; and also show results on

thermal comfort under different models such as the analytical one under the PMV and PPD indexes. This contribution aims to compare the comfort perceived by occupants of naturally ventilated classrooms in the tropics, with the PMV under the theoretical model and the PMV thrown by the simulation, in order to determine weaknesses and strengths.

Field work was carried out in Cali, Colombia, in tropical climatic condition, in 2 classrooms of a school, naturally ventilated. The methodology was environmental auditing, with a subjective and an objective component. The subjective component consisted of a survey of 61 first-level high school students, while they were in class in the month of August of 2017. The objective component: measurements of thermal comfort variables, was carried out simultaneously with the survey.

The analysis shows significant differences between the three methodologies. The theoretical model was more demanding than the reality recorded and expressed by the students, which was closer to comfort. While the simulated model predicted a frankly different comfort situation, despite presenting temperatures close to the measured reality. This leaves concerns about the most appropriate method at the moment to predict comfort in naturally ventilated classrooms

Keywords: Thermal comfort, PMV, PPD, naturally ventilated classrooms, simulation.

Introducción

Para realizar el diseño arquitectónico de colegios considerando el confort térmico, es necesario remitirse a las normas colombianas 4595: Ingeniería Civil y Arquitectura. Planeamiento y Diseño de Instalaciones y Ambientes Escolares (ICONTEC, 2000), y la NTC 5316: Condiciones Ambientales Térmicas de Inmuebles para Personas (ICONTEC, 2004). La primera, establece recomendaciones de diseño para el confort térmico (sin especificar condiciones ambientales) y la última, es una adopción idéntica por traducción (IDT) de la norma ANSI/ASHRAE 55.

ASHRAE establece dos métodos para determinar el confort en un ambiente: el adaptativo y el analítico. El primero, enfocado en la predicción del confort en espacios naturalmente ventilados; y el segundo, basado en principios de termorregulación y en el índice del voto medio previsto PMV (del ingl. Predicted Mean Vote) desarrollado por Fanger (P.O. Fanger, 1970), permite predecir el voto medio en el que se pueden encontrar los ocupantes de un espacio a partir de la escala de sensación térmica de siete puntos, para tomar decisiones de diseño, y que se complementa con el porcentaje de personas insatisfechas PPD (del ingl. Predicted Percent Dissatisfied).

Los rangos establecidos en las normas internacionales han sido cuestionados por resultar de investigaciones en laboratorio. A partir de 1950 comienzan a aparecer estudios que pusieron en duda dichos rangos en la marina (Ellis & Navy, 1952). Y, como lo indican Chappells y Shove (2004) y Gómez-Azpeitia, Morales, y Torres (2013), posteriormente aparecen otros estudios en viviendas, fábricas y oficinas naturalmente ventiladas (Auliciems, 1981; Busch, 1992; de Dear & Fountain, 1994; Nicol, 1993), en donde se demuestra que el confort térmico evaluado en el mundo “real” difiere del propuesto por las normas internacionales.

Autores como Humphreys (1994) y Oseland (1995), demostraron que un grupo de personas con la misma ropa y actividad pueden tener opiniones diferentes en cuanto al confort, esto mismo lo desarrollan Humphreys y Nicol (1998), con estudios con trabajadores en las fábricas. Por otro lado, estudios realizados en edificios (Gonzalez & Bravo, 2001; Nicol, 2004; Nicol & Wilson, 2011), mostraron que los métodos universales para definir estándares y calcular el confort resultan inadecuados frente a las variaciones culturales y climáticas de las personas.

El confort térmico en colegios se comenzó a investigar en países en las zonas templadas con las cuatro estaciones, en donde las condiciones de confort se dan la mayor parte del año gracias a equipos de climatización. Esta situación es diferente a las aulas ventiladas naturalmente. Varias investigaciones se han dado a la tarea de comparar la sensación térmica de las personas en aulas con aire acondicionado, y ventiladas naturalmente (Kwok, 1997; Kwok & Chun, 2003a; Hwang, Lin, & Kuo, 2006).

Tablada, De La Peña y De Troyer (2005), señalan que los estudios desarrollados en las últimas tres décadas en colegios ventilados naturalmente en climas cálidos, demuestran que la sensación térmica reportada es más cálida que la indicada por la norma ASHRAE (Liang, Lin, & Hwang, 2012). Por el contrario, Hwang, Cheng, Lin y Ho (2009) indican que el rango de confort para una aceptabilidad térmica del 80% es más bajo que el indicado en la misma norma, y estudios como el realizado por Kwok, Reardon, & Brown (1998) demuestran que los votos de sensación térmica exceden la aceptabilidad del 80%.

En entornos cálidos y tropicales se ha comparado la evaluación del confort en diferentes momentos del año indicando confort en verano a 30.7°C y una aceptabilidad del 78% (Baruah, Singh & Mahapatra, 2014), 31°C ET (del ingl. Effective Temperature) con 57% de aceptabilidad (Kwok, 1997), y a 30°C con 90% de aceptabilidad (Hwang et al. 2009) y 32°C en el mes de mayo.

Metodología

Las condiciones ambientales se evaluaron a partir de la técnica de la auditoría ambiental de percepción del usuario (San Juan, Hoses & Martini, 2014), basada en la medición de los parámetros ambientales (objetivos) y el sondeo de los factores de confort del usuario (subjetivos), con el fin de caracterizar el medio ambiente del aula. La auditoría se realizó entre el 4 y el 31 de agosto de 2017, durante el periodo seco en dos aulas ubicadas en el segundo (aula 1), (figura 1), y tercer, y último piso (aula 2), (figura 2), ventiladas naturalmente y ocupadas entre las 7:00 a.m. y las 2 p.m.



Figura 1: Interior aula 1 piso 2



Figura 2: Interior aula 2, piso 3

Fuente: archivo investigación

Para el registro de los parámetros ambientales se hicieron mediciones continuas durante 27 días y puntuales utilizando instrumental específico (en simultáneo con la encuesta), obteniéndose datos objetivos. Por otro lado, los factores de confort del usuario, se abordaron a través de una encuesta de percepción del usuario. El procesamiento de la información implica: (i) presentar en forma descriptiva los resultados; (ii) analizar en forma relacional las variables analizadas a partir de los dos tipos de auditoría; (iii) comparar los resultados en función de los rangos de confort normativos considerados:

- Rango de confort para verano: $22.5^{\circ}\text{C} \leq T_o \leq 26^{\circ}\text{C}$ a 60 %HR (NTC 5316, 2015)
- $24.0^{\circ}\text{C} \leq T_o \leq 27^{\circ}\text{C}$ a 50 %HR, con 1.0 clo, y $1.0 \leq \text{met} \leq 1.3$ (Standard, 2017)
- PMV en confort: $-0,5 \leq \text{PMV} \leq +0,5$ (Standard, 2017)

Auditoria Objetiva

Las mediciones continuas se realizaron con adquirentes de datos con registro cada 10 minutos, para la medición de: temperatura ambiente interior T_a ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa HR (%), velocidad del aire v_a (m/s), (Tabla 1). Además, en simultáneo con la encuesta se realizaron mediciones de: velocidad del aire (m/s) y temperatura superficial de muros, piso y techo T_{sup} ($^{\circ}\text{C}$), con el fin de establecer la Temperatura operativa- T_o , en relación con el confort percibido y con los rangos de confort de la norma.

Tabla 1: Equipos para el registro de parámetros climáticos. Fuente: elaboración propia

PARÁMETROS	EQUIPO	MARCA	DESCRIPCIÓN
Temperatura ambiente exterior (T_{ext}), y humedad relativa (HR_{ext}).	Termo-higrómetros	HOBO U23 Pro V2	Precisión $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ entre 0° a 50°C , $\pm 2.5\%$ entre 10% a 90% RH (típico), y resolución de 0.02°C a 25°C , y 0.05 %
Temperatura ambiente interior (T_a , T_{ext}), y humedad relativa (HR_{ext}).	Termo-higrómetros	HOBO U12-012	Precisión $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ entre 0° a 50°C , $\pm 2.5\%$ entre 10% a 90% RH típico, y resolución de 0.03°C a 25°C , y 0.05 %.
Velocidad del aire (v_a).	Anemómetro	Lutron LM-8000	Rango de 0.4 a 30.0 m/s con resolución 0.1 m/s.
Temperatura superficial (T_{sup}).	Termómetro infrarrojo	NUB 8380	Rango entre -50 a 380°C , y exactitud de $\pm 2\%$.

Auditoría Subjetiva

Las encuestas se aplicaron a 61 estudiantes de dos aulas del grado 7^{mo} de secundaria, así: 29 del aula 1, y 32 del aula 2, entre los 11 y 15 años de edad, autorizados por sus padres o acudientes, y de acuerdo a los lineamientos del comité de bioética de la Universidad de San Buenaventura, Cali. Los datos referidos al confort térmico, incluidos en la encuesta de opinión son: (i) Personales; (ii) Estado del tiempo; (iii) Prendas de vestir; (iv) Temperatura y humedad relativa; (v) Ventilación y calidad del aire; (viii) Satisfacción (San Juan, Hoses, Rojas, & Moreno, 1999). Los valores para el aislamiento de las prendas de vestir clo (del ingl. clothes) y para la actividad met (metabolic rate) se basaron en la norma ANSI/ASHRAE Standard 55 (2010), al igual que la escala de sensación térmica, indicada como: muy caluroso (+3), caluroso (+2), ligeramente caluroso (+1), neutro (0), ligeramente fresco (-1), fresco (-2) y frío (-3) (UNE-EN ISO 7730, 2006). Además, se preguntó por las estrategias para adaptarse a las condiciones térmicas (como: abrir y cerrar ventanas, cambiarse de lugar, abrigarse más o menos) y sobre la ventilación natural (si se percibe la ventilación, si es molesta y sobre el lugar más fresco del salón).

Para identificar los votos de sensación térmica VST, en confort en el aula se halla la media ponderada por salón. Para el cálculo de los índices PMV se usó la herramienta para el confort térmico CBE/ASHRAE (Hoyt, Schiavon, Piccioli, Cheung & Moon, 2017), aplicada en el Standard 55 User's Manual (ASHRAE, 2013), usada en el análisis térmico de aulas en clima ecuatorial (Subhashini & Thirumaran, 2018b), en viviendas tropicales (Rodrigo, Sanabria, Marchamalo, & Umana, 2012) y en aulas universitarias en clima sub-tropical (Baruah, Singh & Mahapatra, 2014). El PMV tiene por insumo las mediciones realizadas en Cali de temperatura interior del aire T_a [$^{\circ}\text{C}$], humedad relativa HR [%], velocidad del aire v_a [m/s], and temperatura superficial de cada una de las superficies de la envolvente T_{sup} [$^{\circ}\text{C}$]; y los valores de clo y met son los indicados por la norma para la situación de verano en aulas. La temperatura media radiante, T_r , se determinó usando factores de forma, emisividades, las temperaturas T_{sup} de cada superficie (Forbes, 2017) y la ecuación (1) presentada en el capítulo No. 8 de ASHRAE (ASHRAE 2005). La temperatura operativa, T_o , se calcula mediante la ecuación (2) propuesta por ASHRAE (Standard, 2017):

$$1) \quad \overline{T_r} = T_1 F_{f-1} + T_2 F_{f-2} \dots + T_N F_{f-N}$$

Dónde: T_r = Temperatura radiante; F_{f-1} = Factor de forma para cada una de las superficies de la envolvente.

$$2) \quad T_o = A * T_a + (1 - A) T_{mr}$$

Dónde: T_o = Temperatura operativa; T_a = Temperatura del aire/ T_{mr} = Temperatura media radiante y A (valor en función de la velocidad del aire) = 0.5 (si <0.2m/s); = 0.6 (0.2 a 0.6 m/s); = 0.7 (0.6 a 1.0 m/s).

Casos de estudio

Se seleccionaron dos aulas de dos edificios de nivel escolar primario, con organización tipológica lineal en donde se disponen los bloques de aulas, conformando patios. La orientación solar de las fachadas principales es norte (aula 1) y sur (aula 2), no plena, situación característica de la producción arquitectónica local. La envolvente del edificio está conformada por muros en bloque de cemento hueco con repello y enchape de piedra, y cubierta metálica con material aislante en su interior, tipo sándwich. Las aulas se disponen en las plantas bajas (segundo piso) y altas (tercer piso), con el fin de comparar la incidencia de la radiación en cubierta, en el confort (tabla 2).

Tabla 2: Aulas del estudio. Fuente: elaboración propia

AULA	AREA (m ²)	ALTURA (m)	VOLUMEN (m ³)	NÚMERO DE OCUPANTES	AREA / OCUPANTES (m ²)	AREA DE VENTANAS (m ²)	RELACION AREA DE VENTANA Y SALON (%)
1 (Piso2)	87.4	3.6	252.2	38	2.3	10.5	12
2 (Piso3)	68.7	4.1	360.0	35	1.9	10.5	15

Simulación

Para la simulación se utilizó el software Energy-Plus versión 8.7. Se utilizó el archivo climático extensión EPW para Cali, disponible en la base de Energy-Plus. Se simularon los días de semana de todo el año, con excepción de los periodos de vacaciones. Sin embargo, para comparar las situaciones medidas en campo, frente a las simuladas, se utilizaron los datos del mes de agosto. Se construyó un modelo base de las dos aulas, con sus zonas térmica independientes, y las características físicas y espaciales que lograron sintetizar las condiciones de las aulas del estudio.

Para la simulación de la ventilación natural se configuran 12 renovaciones por hora, y el horario de apertura de las ventanas es durante el uso de las aulas, con un porcentaje de 20% de ventilación permanente, ejemplificando las persianas en fachada y galería, que promueven la ventilación cruzada permanente.

Resultados

Contexto climático de Santiago de Cali

La investigación se realizó en la ciudad de Cali, Lat 3º 25' N y Long 76º 30' O, a 995 msnm promedio, con clima tropical lluvioso de sabana con verano seco -As- según la clasificación de Köppen (IDEAM n.d.). Presenta condiciones homogéneas durante todo el año sin ciclos estacionarios, con poca variación dependiendo de la temporada de lluvia. Según los registros tomados durante el mes de agosto, la temperatura media es de 26.2°C, la temperatura máxima está cerca de 31 °C y permanece así desde el mediodía hasta las 17 h, y la temperatura mínima baja hasta 22°C en horas de la madrugada. La humedad relativa mínima hacia el medio día es de 42 %, la media de 63%, y la humedad relativa máxima, es de 81 % hacia la madrugada. (Figura 1).

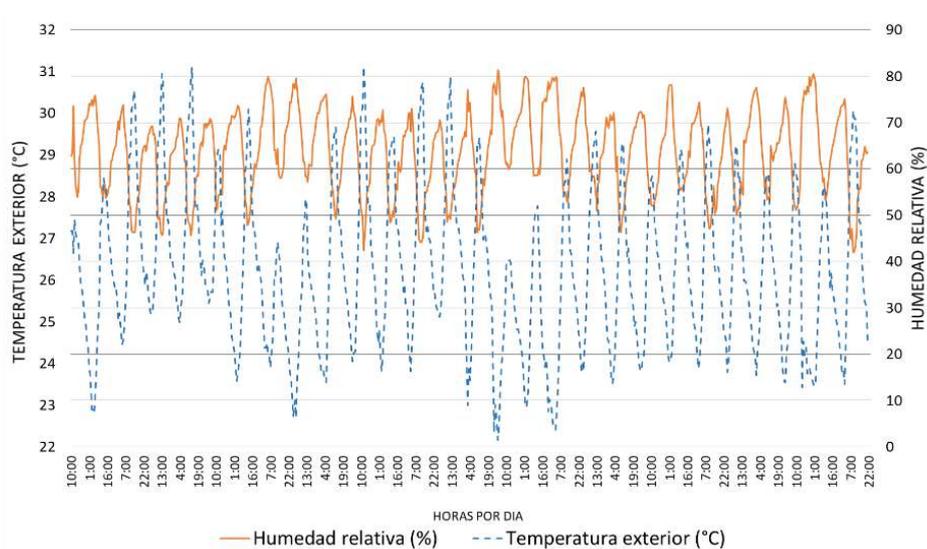


Figura 1: Temperatura y humedad periodo de medición (agosto) en el colegio de estudio. Fuente: elaboración propia

Temperatura operativa: situación medida frente a la simulada

Las dos variables que intervienen en la definición de la T_D , son la T_a y la T_{mr} , las cuales están directamente relacionada con la arquitectura. Los valores de la T_{sup} medidos en simultáneos con la encuesta, y el factor de forma de cada superficie, fueron el insumo principal para definir la T_r en cada una de las aulas (Forbes, 2017), presentados en la tabla 3. Los resultados muestran que el material del piso y techo en relación con los demás componentes tienen el mayor peso (el piso entre 43% y 45%, y el techo entre el 26% y 25% para el aula 1 y 2 respectivamente) al momento de definir la T_r del espacio.

Tabla 3: Valores para hallar la T_r en las aulas. Fuente elaboración propia

COMPONENTE Y MATERIAL		EMISIVIDAD (ε)	TEMPERATURA SUPERFICIAL		FACTOR DE FORMA	AULA 1	AULA 2
			AULA 1	AULA 2			
PISO	BALDOSA CAFÉ COLOR OSCURO	0.82	25.48	28.26	0.44	11.21 (43%)	12.43 (45%)
M1	BLOQUE DE CONCRETO PINTADO DE BLANCO	0.84	25.76	25.98	0.10	2.58 (10%)	2.60 (9%)
M2		0.84	24.96	25.58	0.09	2.25 (9%)	2.30 (8%)
M3		0.84	25.28	25.54	0.07	1.77 (7%)	1.79 (6%)
M4	BLOQUE DE CONCRETO + ENCHAPE EN PIEDRA	0.92	25.64	25.88	0.06	1.54 (6%)	1.75 (6%)
TECHO	PLACA CONCRETO	0.92	25.48	25.70	0.27	6.88 (26%)	6.94 (25%)
TEMPERATURA MEDIA RADIANTE (T_r)						26.23	27.81

A partir de la T_r (tabla 2) y de la T_a entre 27.4 °C y 28.9 °C al momento de la encuesta, se define la T_o para cada una de las aulas como se puede observar en la tabla 4.

Tabla 4: Valores para identificar la T_o al momento de la encuesta. Fuente: elaboración propia

	T_a (°C)	T_{mr} (°C)	A	T_o (°C)
Aula 1	27.4	26.2	0.50	26.8
Aula 2	28.9	27.8	0.50	28.4

La correlación entre la situación medida al interior de las aulas y los modelos simulados, resultó *muy alta* para el aula 1 ($R^2=0.77$) y para el aula 2 ($R^2=0.75$); como también fue muy alta la relación entre las T_o promedio por aula durante el mes de medición, las cuales presentaron una coincidencia total en el aula 2, y tan solo una variación de 1°C en el aula 1. Por otro lado, las T_o máximas tuvieron una variación entre 1°C y 2°C; mientras las T_o mínimas variaron entre 1°C y 3°C (Tabla).

Tabla 5: Comparación aulas simuladas y medidas en trabajo de campo durante 30 días del mes de estudio. Fuente: elaboración propia

T_o (°C)	AULA 1		AULA 2	
	SIMULADA(°C)	MEDIDA (°C)	SIMULADA (°C)	MEDIDA (°C)
Máximas	29	30	34	32
Promedio	25	26	27	27
Mínimo	20	23	20	23

Por otro lado, en el aula 1 el modelo resultó levemente por debajo de la situación medida, con T_o inferiores entre 1°C y 3°C (Figura 3); mientras en el aula 2, la T_o fueron 2°C más elevadas en los momentos más cálidos, y bajaron 3°C por debajo de las registradas con los equipos. Además, el modelo del aula 1 queda en el horario de uso entre el rango de confort indicado por la norma, situación contraria al aula medida in situ, la cual lo sobrepasa. En el caso del aula 2, tanto el modelo medido como el simulado, exceden el rango indicado dentro del horario de uso del aula, como se presenta en la Figura .

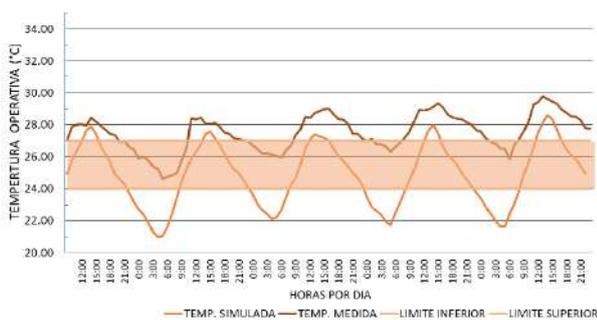


Figura 3: Comparación T_o medida vs simulada días típicos en el aula 1

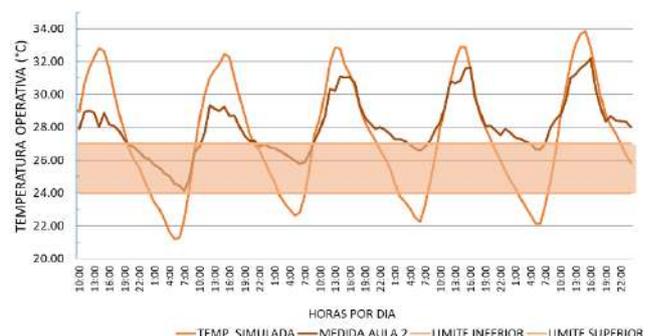


Figura 4: Comparación T_o medida vs simulada días típicos en el aula 2

Fuente: elaboración propia

Confort: situación medida, teoría y simulación

El trabajo de campo realizado en las aulas arrojó una media ponderada de VST con valores cercanos al PMV en confort entre $-0.5 \geq PMV \leq +0.50$, con media de VST de -0.55 en el aula 1 (26.8°C To), y -0.53 en el aula 2 (28.4 °C To). Mientras el resultado de la To en el aula 1 estuvo dentro del rango de confort indicado por la norma (Standard, 2017), en el aula 2 la media de VST resultó muy cercano al resultado del aula 1, y al PMV de confort, la To excedió el rango de To indicado (Tabla 5).

En el mismo sentido, la mayoría de los votos resultaron cercanos al confort (49%), dentro de las tres categorías centrales (-1, 0, +1), con To entre 26.8°C y 28.4°C demostrando que en contextos tropicales y ambientes ventilados naturalmente las personas toleran más altas temperaturas (Baruah, Singh & Mahapatra, 2014; Subhashini & Thirumaran, 2018a). Sin embargo, llama la atención que la mayoría de los votos en disconfort se encuentren dentro de la situación de frío (41%) y no de calor (10%), dado los resultados de las temperaturas. Al consolidar los votos en el PPD o los votos que no están en las tres categorías centrales (ASHRAE, 2005), por disconfort por frío y calor, resulta un 51% de los estudiantes en disconfort, porcentaje que excede 10% del PPD indicado por la norma para espacios confortables (ASHRAE, 2005).

Tabla 5: Votos de sensación térmica en las aulas 1 y 2. Fuente: elaboración propia

AULA	T _{a ext} (°C)	T _a (°C)	HR _{ext} (%)	HR _{int} (%)	T _r (°C)	T _o (°C)	Media VST	ESCALA DE SENSACION TERMICA							TOTAL VOTOS
								-3	-2	-1	0	1	2	3	
1	26.5	27.4	60.0	57.4	26.2	26.8	-0.55	1	11	4	5	4	3	1	29
2	26.9	28.9	57.7	53.9	27.8	28.4	-0.53	1	12	1	10	6	1	1	32
Total Votos								2	23	5	15	10	4	2	61
Total porcentaje de votos (%)								3.3	37.7	8.2	24.6	16.4	6.6	3.3	100%
Total porcentaje votos en confort y disconfort								41		49			10		

Con el fin de contrastar la predicción del confort entre la teoría, el trabajo de campo y la simulación, se identifican los valores de PMV para cada una de las aulas, a partir de la herramienta de confort térmico de la Universidad de Berkeley (Hoyt-, Schiavon, Piccioli, Cheung & Moon, 2017). Al valor hallado bajo este procesamiento se le denominará PMV (CBE). Los datos solicitados por el CBE Tool son: T_o , v_a , %HR interior, met y clo. El valor de PMV (CBE) resultante para el aula 1 es de 0.47 y 10% PPD (figura 5); y para el aula 2, en disconfort, es de 0.84 y 20% de PPD (figura 6).

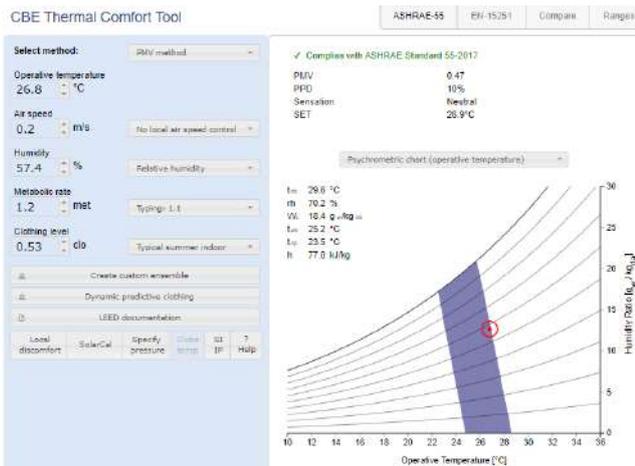


Figura 5: PMV y PPD en el aula 1. Fuente: CBE Comfort Tool



Figura 6: PMV y PPD en el aula 1. Fuente: CBE Comfort Tool

Fuente: <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>

Los porcentajes de PMV y PPD bajo los modelos simulados se denominarán PMV (SIM) y PPD (SIM), y corresponden a los siguientes valores al momento de la encuesta: para el aula 1 PMV (SIM)= -4.8 y 100% de PPD (SIM); y para el aula 2 PMV(SIM)= -3.8 y 99% de PPD (SIM).

Al comparar los resultados bajo las tres metodologías como se muestra en la figura 6: bajo los votos de sensación térmica (VST), PMV teórico PMV (CBE) y PMV simulado PMV (SIM); se puede observar en la figura 7 que la percepción de los estudiantes tiende a estar cercana al confort, y sorprendentemente con predominancia de disconfort por situación de frío, con valores de PMV entre -0.51 a -1, con T_o entre 26.8 y 28.4°C.

Por otro lado, el PMV (CBE) define confort para el aula 1, y disconfort por calor en el aula 2 (figura 7). Diagnóstico que corresponde con el rango de confort definido por norma(Standard, 2017), con límite máximo de 27°C para estar en confort. Por último, el análisis del PMV bajo la simulación, arroja valores disímiles a los anteriores, con diferencias leves de T_o entre 1°C y 1.5°C al momento de la encuesta, pero con valores distantes del $-3.8 \geq \text{PMV (SIM)} \leq -4.8$.

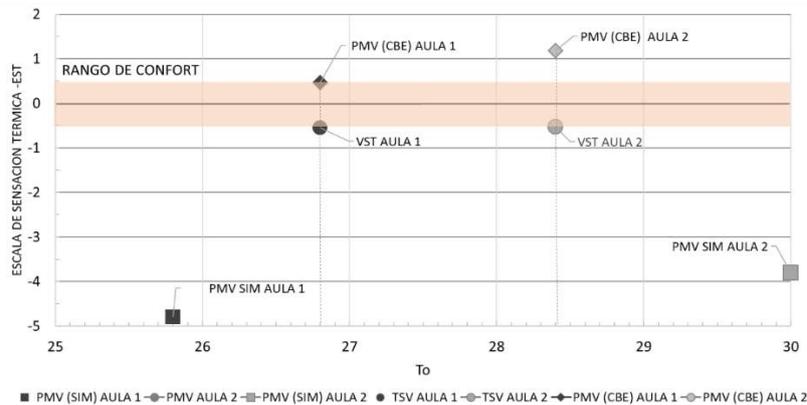


Figura 7: Comparación VST, PMV teórico (CBE) y PMV (SIM) en las aulas 1 y 2

Discusión y Conclusiones

Por otro lado, el PMV (CBE) bajo el modelo teórico, arroja mayor disconfort por calor en comparación con los VST expresados por los estudiantes en las encuestas. Situación que puede derivar en sobredimensionamiento de los diseños, y como consecuencia, en el aumento del consumo energético de los edificios. Por su parte, los votos expresados por los estudiantes, evidenciaron no solo confort a temperaturas operativas superiores a 28°C, sino disconfort por situación de frío, lo que reafirma el acostumbramiento de los ocupantes de espacios naturalmente ventilados a temperaturas que exceden el rango normativo, y que, aun así, manifiestan confort.

Para estudios futuros, es importante profundizar en las posibles causas que inciden en la percepción de disconfort por frío en estos espacios, como situaciones culturales, de género, edad, o derivadas de estados carenciados de la población objeto del estudio.

Los resultados de las dos metodologías: PMV (CBE) teórico y PMV (SIM) simulado, se mantuvieron cercanos a la franja de PMV en confort; mientras el PMV (SIM) arrojó resultados drásticamente diferentes, a pesar de presentar diferencias leves de Temperatura operativa, lo que puede constituir una línea de profundización a futuro.

Estudios como el presentado, permiten aportar en el diagnóstico del confort en espacios naturalmente ventilados en situación tropical, para proponer la revisión de los rangos de confort indicados por las normas locales, que son traducción de la norma internacional ASHRAE; como también, implementar protocolos locales para la reducción de errores entre la realidad medida y los modelos simulados.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los rectores, profesores y alumnos de los cuatro colegios del estudio, así como también a la Secretaría de Educación Municipal de Santiago de Cali. Este proyecto se deriva del proyecto de investigación: Identificación de factores de desempeño ambiental (acústico, térmico y visual) determinantes de la salud de docentes y estudiantes de escuelas públicas de Bogotá, Medellín y Cali: línea base para el análisis de impacto de la política pública según la norma NTC 4595. Convocatoria 744: para proyectos de ciencia, tecnología e innovación en salud – 2016. Colciencias.

También en Cali se agrade a Colciencias, a la Universidad de San Buenaventura, Medellín, Universidad de San Buenaventura, Cali, Universidad de La Salle, Bogotá, D. C., a la Universidad Nacional de La Plata, Argentina y a todos los docentes y estudiantes que participaron en el proyecto.

Referencias

- Al-Rashidi, KE, DL Loveday, & NK Al-Mutawa. 2009. "Investigating the Applicability of Different Thermal Comfort Models in Kuwait Classrooms Operated in Hybrid Air-Conditioning Mode." *Sustainability in energy and ...*: 347–55.
- ANSI/ASHRAE Standard 55. 2010. "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy." *ASHRAE Inc.* 2010: 42.
- ASHRAE. *Standard 55-2013 User's Manual: ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.*
- ASHRAE. 2005. "Capítulo 8: Thermal Comfort." In *ASHRAE Handbook—Fundamentals*, , 29.
- Auliciems, A. 1981. "Towards a Psycho-Physiological Model of Thermal Perception." *International Journal of Biometeorology* 25(2): 109–22.
- Baruah, Plabita, Manoj Kumar Singh, & Sadhan Mahapatra. 2014. "Thermal Comfort in Naturally Ventilated Classrooms." In *30th International Plea Conference. Ahmedabad*, 1–8.
- Busch, J F. 1992. "Thermal Responses to the Thai Office Environment." *ASHRAE transactions* 96.
- . 1995. "11 Thermal Comfort in Thai Air-Conditioned and Naturally Ventilated Offices." *Standards for Thermal Comfort: Indoor Air Temperature Standards for the 21st Century*: 114.
- Chappells, Heather, & Elizabeth Shove. 2004. "Comfort: A Review of Philosophies and Paradigms." *Lancaster University: Centre for Science Studies*.
- De Dear, R. J., Brager, G. S., Reardon, J., & Nicol, F. 1998. "Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference/Discussion." *ASHRAE Transactions*: 104–45.
- de Dear, Richard J., & Marc E. Fountain. 1994. "Field Experiments on Occupant Comfort and Office Thermal Environments in a Hot-Humid Climate." In *ASHRAE Transactions*.
- Ellis, F P, & Royal Navy. 1952. "Thermal Comfort in Warm, Humid Atmospheres Observations in a Warship in the Tropics." *Epidemiology & Infection* 50(3): 415–32.
- Forbes, Freddy Javier. 2017. "Diseño de una aplicación computacional para el cálculo de Factor de visión y TMR En Espacios Arquitectónicos."
- Gómez-Azpeitia, Gabriel, Gonzalo Bojórquez Morales, & Raúl Pavel Ruiz Torres. 2013. "El Confort Térmico: Dos enfoques teóricos Enfrentados/Thermal Comfort: Two Confronted Theoretical Focuses." *Palapa* 2(1): 45–57.
- Gonzalez, E, & G Bravo. 2001. "Toward Appropriate Comfort Temperatures to the Hot and Humid Climatic Conditions." *PLEA 2001 Proceedings*: 823–27.
- Haghighat, Fariborz, & Giovanna Donnini. 1999. "Impact of Psycho-Social Factors on Perception of the Indoor Air Environment Studies in 12 Office Buildings." *Building and Environment* 34(4): 479–503.
- Hoyt Tyler, Schiavon Stefano, Piccioli Alberto, Cheung Toby, Moon Dustin, & Steinfeld Kyle. 2017. "CBE Thermal Comfort Tool." *Center for the Built Environment, University of California Berkeley*. <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>.
- Humphreys, Michael A & J Fergus Nicol. 1998. "Understanding the Adaptive Approach to Thermal Comfort." *ASHRAE transactions* 104: 991.
- Humphreys, Rev. M.A. 1994. "An Adaptive Approach to the Thermal Comfort of Office Workers in North West Pakistan." *Renewable Energy* 5(5–8): 985–92.
- Hwang, Ruey-Lung, Tzu-Ping Lin, Chen-Peng Chen, & Nai-Jung Kuo. 2009. "Investigating the Adaptive Model of Thermal Comfort for Naturally Ventilated School Buildings in Taiwan." *International journal of biometeorology* 53(2): 189–200.

- Hwang, Ruey-Lung, Tzu-Ping Lin, & Nai-Jung Kuo. 2006. "Field Experiments on Thermal Comfort in Campus Classrooms in Taiwan." *Energy and Buildings* 38(1): 53–62.
- ICONTEC. (2000). Norma Técnica Colombiana 4595 Ingeniería Civil y Arquitectura Planeamiento y Diseño de Instalaciones y Ambientes Escolares Comentarios Sobre el Tema de Norma Técnica Colombiana NTC 4596 Señalización para Instalaciones y Ambientes Escolares.
- ICONTEC. (2004). Norma Técnica Colombiana NTC 5316. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
- IDEAM. "Capítulo 9. Clasificación de Los Climas." <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/clima-text.pdf>.
- Kwok, Alison G., & Chungyoon Chun. 2003a. "Thermal Comfort in Japanese Schools." *Solar Energy* 74(3): 245–52.
- Kwok, Alison G. 1997. "Thermal Comfort in Naturally-Ventilated and Air-Conditioned Classrooms in the Tropics."
- Kwok, Alison G, & Chungyoon Chun. 2003b. "Thermal Comfort in Japanese Schools." *Solar Energy* 74(3): 245–52.
- Kwok, Alison G, James Reardon, & Karl Brown. 1998. "Thermal Comfort in Tropical Classrooms/Discussion." *ASHRAE Transactions* 104: 1031.
- Liang, Han-Hsi, Tzu-Ping Lin, & Ruey-Lung Hwang. 2012. "Linking Occupants' Thermal Perception and Building Thermal Performance in Naturally Ventilated School Buildings." *Applied Energy* 94: 355–63.
- Nicol, Fergus. 2004. "Adaptive Thermal Comfort Standards in the Hot-humid Tropics." *Energy and Buildings* 36(7): 628–37.
- Nicol, J. Fergus, & Mike Wilson. 2011. "A Critique of European Standard EN 15251: Strengths, Weaknesses and Lessons for Future Standards." *Building Research & Information* 39(2): 183–93.
- Oseland, N. A. (1995). Predicted and Reported Thermal Sensation in Climate Chambers, Offices and Homes. *Energy and Buildings*, 23(2), 105–115. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00934-5](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00934-5) and Reported Thermal Sensation in Climate Chambers, Offices." *Energy and Buildings* 23(2): 105–15.
- P.O. Fanger. (1970). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*.
- Rodrigo, B G, J C Sanabria, M Marchamalo, & M Umana. 2012. "Análisis Del Confort y El Comportamiento Higrotérmico de Sistemas Constructivos Tradicionales y Actuales En Viviendas de Santa Ana-Ciudad Colón (Costa Rica)." *Informes de la Construcción* 64(525): 75–84.
- San Juan, G., Hoses, S., Rojas, D., & Moreno, J. (1999). Integración de la opinión de los usuarios en la evaluación ambiental de aulas escolares. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente, ISSN*, 329–5184.
- San Juan, Gustavo, Santiago Hoses, & Irene Martini. 2014. "Aprendizaje En Las Escuelas Del Siglo XXI: Nota 5: Auditoría Ambiental y Condiciones de Confort En Establecimientos Escolares."
- Standard, ASHRAE. 2017. "Standard 55–2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy." *Ashrae: Atlanta, GA, USA*.
- Subhashini, S., & K. Thirumaran. 2018a. "A Passive Design Solution to Enhance Thermal Comfort in an Educational Building in the Warm Humid Climatic Zone of Madurai." *Journal of Building Engineering*.
- . 2018b. "A Passive Design Solution to Enhance Thermal Comfort in an Educational Building in the Warm Humid Climatic Zone of Madurai." *Journal of Building Engineering* 18(April): 395–407. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.04.014>.
- Tablada, Abel, Ana M De La Peña, & Frank De Troyer. 2005. "Thermal Comfort of Naturally Ventilated Buildings in Warm-Humid Climates: Field Survey.": 13–16.